

**Caracterização do Escoamento Atmosférico
em Terreno Complexo
com Dispositivo de Medição Remota LIDAR**

Ricardo Simão Rodrigues da Devesa

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Álvaro Rodrigues

Coorientador: Eng. Amândio Ferreira

Mestrado integrado em Engenharia Mecânica

Especialização em Energia Térmica

Junho de 2017

Aos meus pais

Resumo

O constante aumento da potência e dimensão dos aerogeradores leva à necessidade da caracterização do escoamento atmosférico a alturas cada vez maiores, o que se traduz num aumento de complexidade, custo e lentidão da campanha de medição.

A utilização de LIDARs para a caracterização do escoamento atmosférico é uma solução que tem vindo a adquirir uma popularidade crescente no seio da indústria de conversão de energia de fonte eólica. Uma prova do apoio crescente em torno desta tecnologia é o facto de, na atualização da norma IEC 61400, existir, pela primeira vez, uma secção dedicada à realização de campanhas de medição através de dispositivos de medição remota. No entanto, e devido às limitações que estes sistemas apresentam quando implementados em terreno complexo, apenas são referidos procedimentos para a sua utilização em terreno plano. Subsistem dificuldades, quer na operação, quer na interpretação dos resultados quando estes dispositivos são utilizados em terrenos de orografia muito marcada.

Com intuito de estudar e tentar perceber que factores mais influenciam os desvios entre as medições efetuadas neste tipo de terrenos, foram efetuadas duas campanhas de medição com recurso a um LIDAR *ZephIR*, possuindo como referência os valores obtidos em estações e instrumentos convencionais também instaladas nos locais de medição.

Aos dados obtidos nestas campanhas foram realizados diversos testes de sensibilidade, relacionando os desvios percentuais apresentados pelos dois sistemas de medição, em função de diversas variáveis ambientais. A partir destes testes, observou-se um claro aumento do desvio entre as medições com o aumento de parâmetros como o *shear factor*, a intensidade de turbulência ou o RIX.

Characterization of a wind flow in complex terrain with a remote sensing device LIDAR

Abstract

The constant grow in power and size of wind turbines has led to the necessity of flow characterization at increasingly higher heights, which increases the level of complexity, cost and time of implementation of the measurement campaign.

The use of LIDARs to characterize the wind flow is a solution that has been gaining a growing support and popularity from the wind energy conversion industry. Indeed, in the recent update of the International Standard for wind energy generation systems there is, for the first time ever, a section fully dedicated to the operation of a measurement campaign using remote sensing devices. However, due to the limitations exhibit by this technology in complex terrain, only campaigns performed in simple terrain are referred in this standard. Either there are still difficulties in the operation, or in the interpretation of the results obtained when this type of instruments are used in complex terrains.

With the purpose of study and understand which factors have a bigger impact in the measurements deviations in this type of terrain, two measurement campaigns were carried out using a *ZephIR* LIDAR, having as reference values obtained by mast towers installed in the same site.

The data collected in this campaigns was analysed by performing multiple sensibility tests, comparing the percentage deviation of the measurements, in order of diferent environmental variables. Analizing this data, it was identified a clear rise in the deviation between measurements when parameters like shear factor, turbulence intensity or RIX rose as well.

Agradecimentos

A realização desta dissertação nunca teria sido possível sem o apoio de várias pessoas às quais deixo o meu agradecimento. Em primeiro lugar, ao Professor Álvaro Rodrigues por toda a ajuda e ensinamentos prestados durante o período de elaboração desta dissertação.

Ao Eng.º Amândio Ferreira deixo um grande agradecimento por toda o apoio e disponibilidade demonstrados no esclarecimento e partilha de conhecimentos relativos às questões mais complicadas que foram surgindo.

A Eng.º José Carlos Matos e a toda a equipa do INEGI, um agradecimento pelos dados que me foram facultados e pelo espaço que lá ocupei durante os últimos meses, no qual fui sempre bem recebido.

Agradeço ainda ao INEGI e ao Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP, por ter possibilitado as visitas de campo à campanha de medição que se encontra a decorrer na Serra do Perdigão.

Por fim, um grande obrigado aos meus pais e à minha família, pela grande força e apoio que sempre me deram ao longo do meu percurso académico.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do trabalho e motivação	2
1.2	INEGI.....	3
1.3	Objetivos do trabalho	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Medição da Velocidade do Vento.....	5
2.1	Caracterização do escoamento atmosférico	5
2.2	Campanha de medição com recurso a LIDARs	6
2.3	Efeito Doppler.....	8
2.4	Tecnologia LIDAR	9
2.5	LIDAR de Feixe Contínuo.....	10
2.6	LIDAR de Feixe Pulsado	13
2.7	WindScanners	16
3	Utilização de LIDARs em Terreno Complexo	19
3.1	Ângulo de Emissão do Feixe Laser	20
3.2	RIX (“Ruggedness Index”)	22
4	Norma IEC 61400-12-1	23
4.1	Localização do Equipamento de Medição	23
4.2	Sector de Medição.....	23
4.3	Diretivas para a utilização de tecnologia de deteção remota	25
5	Casos de estudo.....	27
5.1	Campanha de Medição na Aboadela.....	27
5.2	Campanha de Medição no Vale de Estrela	42
5.3	Comparação de resultados	53
6	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	57
6.1	Conclusões	57
6.2	Trabalhos futuros	57
	Referências	59
	ANEXO A: Caso de Estudo na Aboadela	61
	ANEXO B: Caso de Estudo em Vale de Estrela	65
	ANEXO C: Filtros Utilizados.....	69
	ANEXO D: Filtragem de dados obtidos - Aboadela	73
	ANEXO E: Filtragem de dados obtidos – Vale de Estrela.....	77
	ANEXO F: Testes de Sensibilidade - Aboadela.....	79
	ANEXO G: Testes de Sensibilidade – Vale de Estrela	89
	ANEXO H: Anexo L da norma IEC 61400.....	99

Índice de Figuras

Figura 1 - Variação da velocidade horizontal do vento na área de varrimento do rotor de um aerogerador.	1
Figura 2 - Terrenos altamente complexos na Europa. Parques eólicos com capacidade entre os 3 e os 322 MW encontram-se identificados por círculos laranjas cujo diâmetro aumenta proporcionalmente com a potência instalada [1].	2
Figura 3 – A vermelho, medição sempre “upwind” de um LIDAR instalado na nacelle de um aerogerador, e a amarelo setores que serão influenciados pela presença do aerogerador.	7
Figura 4 - Frequência de Doppler [6].	8
Figura 5 - Velocidades radiais de um escoamento atmosférico [1].	9
Figura 6 - Cone de medição do LIDAR e situação ideal obtenção do vetor 3D.	9
Figura 7 - Análise cónica ao escoamento efetuada pelo LIDAR <i>ZephIR</i> [1].	10
Figura 8 - Zona de recirculação de um escoamento atmosférico.	11
Figura 9 - Emissão e focagem do feixe laser [6].	11
Figura 10 - <i>ZephIR</i> LIDAR [8].	12
Figura 11 - Análise cónica ao escoamento efetuada pelo LIDAR <i>Windcube</i> [1].	13
Figura 12- Funcionamento de um LIDAR de feixe pulsado.	14
Figura 13 – Período de análise dos sinais devolvidos por <i>range-gating</i> [6].	14
Figura 14 - Ruído medido e reflexão do sinal laser na janela do LIDAR [6].	15
Figura 15 – <i>Windcube</i> [9].	15
Figura 16 – Trajetória complexa de um <i>Windscanner</i> [1].	16
Figura 17 - SRWS (esquerda) e LRWS (direita) [4].	17
Figura 18 - Exemplos de terrenos correspondentes às classes de rugosidade e tipos de orografia do EWA [1].	19
Figura 19 - Componentes verticais da velocidade do vento na passagem por um obstáculo [1].	21
Figura 20 - Requisitos de distância do equipamento de medição de vento e sectores de medição máximos permitidos [10].	24
Figura 21 - Sectores a eliminar devido a influência da torre nas medições obtidas [10].	25
Figura 22 - Local onde foi efetuada a campanha de medição na Aboadela com localização da torre de medição e do LIDAR.	28
Figura 23 - Torre de medição e LIDAR na campanha da Aboadela.	29
Figura 24 - Histograma de ocorrências para a campanha de medição da Aboadela	30
Figura 25 - Rosa dos ventos para a campanha de medição na Aboadela	30
Figura 26 - Regressão linear (dados brutos) entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	31
Figura 27 - Influência do para-raios no desvio das medições entre a anemometria de copos e o LIDAR, a 101 m a.n.s..	32

Figura 28 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, após efetuada a filtragem base, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	35
Figura 29 - Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, em função do azimute do vento, a 20 m a.n.s..	37
Figura 30 - Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, em função do azimute do vento, a 101 m a.n.s..	37
Figura 31 - Inclinação do escoamento a 60 m a.n.s. em função do azimute do vento, a 58 m a.n.s..	37
Figura 32 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, a 20 m a.n.s., em função do <i>shear factor</i> .	38
Figura 33 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, a 101 m a.n.s., em função do <i>shear factor</i> .	38
Figura 34 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, a 101 m a.n.s., em função da intensidade de turbulência.	39
Figura 35 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 20 m a.n.s., em função do RIX.	39
Figura 36 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 101 m a.n.s., em função do RIX.	40
Figura 37 - Desvio percentual das medições entre o anemómetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor a 97 m a.n.s., em função da hora do dia.	41
Figura 38 - Desvio percentual das medições entre o anemómetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor a 97 m a.n.s., em função da hora do dia para o período de verão.	42
Figura 39 - Mapa topográfico 3D do local onde foi efetuada a campanha de medição no Vale de Estrela com localização da torre de medição e do LIDAR.	43
Figura 40 - Torre de medição e LIDAR na campanha de Vale de Estrela.	43
Figura 41 - Histograma de ocorrências para a campanha de medição em Vale de Estrela	44
Figura 42 - Rosa dos ventos para a campanha de medição em Vale de Estrela.	45
Figura 43 - Regressão linear (dados brutos) entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, para 20, 40 e 81 m a.n.s.	45
Figura 44 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, após efetuada a filtragem base, para 20, 40 e 81 m a.n.s.	47
Figura 45 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 81 m a.n.s., em função do azimute do vento.	48
Figura 46 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 20 m a.n.s., em função do <i>shear factor</i> .	49
Figura 47 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 81 m a.n.s., em função do <i>shear factor</i> .	49
Figura 48 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 81 m a.n.s., em função da intensidade de turbulência.	50

Figura 49 - Relação entre o shear factor e a intensidade de turbulência no desvio entre as medição de referência e do LIDAR.....	50
Figura 50 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 20 m a.n.s., em função do RIX.	51
Figura 51 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 81 m a.n.s., em função do RIX.	51
Figura 52 - Desvio percentual das medições entre o anemômetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor a 75 m a.n.s., em função da hora do dia.	52
Figura 53 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela, a 101 m a.n.s., em função da intensidade de turbulência.	53
Figura 54 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR na campanha em Vale de Estrela, a 81 m a.n.s., em função da intensidade de turbulência.	53
Figura 55 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela a 20 m a.n.s., em função do <i>shear factor</i>	54
Figura 56 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela a 101 m a.n.s., em função do shear factor.	54
Figura 57 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela, a 101 m a.n.s., em função do RIX.	55
Figura 58 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR na campanha em Vale de Estrela, a 81 m a.n.s., em função do RIX.....	55
Figura 59 - Desvio percentual das medições realizadas à altura de referência entre o anemômetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor instalado na torre de medição, em função da hora do dia, para a campanha na Aboadela (esquerda) e em Vale de Estrela (direita).	56
Figura 60 - Mapa topográfico do local onde foi efetuada a campanha de medição na Aboadela com localização da torre de medição e do LIDAR.....	61
Figura 61 - Mapa de declive do local onde foi efetuada a campanha de medição na Aboadela com localização da torre de medição e do LIDAR.....	61
Figura 62 - LIDAR utilizado na campanha de medição na Aboadela. Alturas de medição em m a.n.s.....	62
Figura 63 - Torre de medição utilizada na campanha de medição na Aboadela. Dimensões em mm.	63
Figura 64 - Mapa topográfico do local onde foi efetuada a campanha de medição no Vale de Estrela com localização da torre de medição e do LIDAR.	65
Figura 65 - Mapa de declive do local onde foi efetuada a campanha de medição no Vale de Estrela com localização da torre de medição e do LIDAR.	65
Figura 66 - LIDAR utilizado na campanha de medição em Vale de Estrela. Alturas de medição em m a.n.s.....	66
Figura 67 - Torre de medição utilizada na campanha de medição em Vale de Estrela. Dimensões em mm.....	67
Figura 68 - Ângulo formado entre as duas extremidades da torres de medição.....	69
Figura 69 - Influência do para-raios nas medições efetuadas.....	69

Figura 70 - Influência da humidades nas medições efetuadas.....	70
Figura 71 - Influência da <i>Spatial Variation</i> nas medições efetuadas	71
Figura 72 – Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 1, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	73
Figura 73 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 2, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	73
Figura 74 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 3, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	74
Figura 75 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 4, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	74
Figura 76 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 5, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	75
Figura 77 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 6, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	75
Figura 78 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 7, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	76
Figura 79 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 8, para 20, 60 e 101 m a.n.s..	76
Figura 80 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 1, para 20, 40 e 81 m a.n.s..	77
Figura 81 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 2, para 20, 40 e 81 m a.n.s..	77
Figura 82 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 3, para 20, 40 e 81 m a.n.s..	78
Figura 83 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 4, para 20, 40 e 81 m a.n.s..	78

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Distâncias de medição e correspondente comprimento de prova [6]	12
Tabela 2 - Valores padrão para o cálculo do RIX	22
Tabela 3 - Resultados brutos da campanha de medição na Aboadela	29
Tabela 4 - Sectores influenciados pela torre de medição	33
Tabela 5 - Resultados obtidos para a campanha de medição na Aboadela após a execução da filtragem base	34
Tabela 6 - Variáveis ambientais estudadas, e respetivos valores máximos, mínimos e intervalos de bin utilizados nos testes de sensibilidade na campanha de medição na Aboadela	35
Tabela 7 - Disponibilidade mensal de dados após a aplicação do filtro base.....	36
Tabela 8 - Resultados brutos da campanha de medição no Vale de Estrela.....	44
Tabela 9 - Resultados obtidos para a campanha de medição no Vale de Estrela após a execução da filtragem base.....	46
Tabela 10 - Variáveis ambientais estudadas, e respetivos valores máximos, mínimos e intervalos de bin utilizados nos testes de sensibilidade na campanha de medição no Vale de Estrela	48
Tabela 11 - Setores influenciados pela torre de medição e para-raios	69
Tabela 12 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do azimute do vento, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.....	80
Tabela 13 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do gradiente térmico, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.	81
Tabela 14 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do shear factor, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.....	83
Tabela 15 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da intensidade de turbulência, para desvios a 20,60 e 101 m a.n.s.	84
Tabela 16 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da inclinação do escoamento, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.....	86
Tabela 17 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do RIX, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.	87
Tabela 18 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do declive médio, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.	88
Tabela 19 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do azimute do vento, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.....	90
Tabela 20 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do gradiente térmico, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.	91
Tabela 21 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do shear factor, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.....	93
Tabela 22 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da intensidade de turbulência, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.	94
Tabela 23 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da inclinação do escoamento, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.....	95

Tabela 24 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do RIX, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.	96
Tabela 25 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do declive médio, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.	97
Tabela 26 - Tamanho de bins para diversas variáveis ambientais [10]	101
Tabela 27 - Parâmetros ambientais para análise de sensibilidade de classe A para anemómetros de copos e sónicos [10].....	102

1 Introdução

O aumento da população mundial, assim como o aumento do nível de vida e a crescente preocupação relativamente a questões ambientais, levam a que as energias de fonte renovável tenham uma importância acrescida, não apenas no presente, mas principalmente tendo em vista o futuro. Dentro destas, a energia de fonte eólica encontra-se muito implementada. Contudo, embora seja uma tecnologia já muito desenvolvida e madura, continuam a existir possibilidades de desenvolvimento, com o objetivo de aumentar a rentabilidade energética e, consequentemente, económica das máquinas. Importante para o atingir destes objetivos é o aperfeiçoamento da caracterização e previsão de escoamentos atmosféricos. Estas medições são convencionalmente efetuadas com recurso a anemómetros de copos montados em torres de medição, sendo assim restringidas à medição da velocidade do vento a apenas uma altura por anemómetro. Há que ter em atenção que, hoje em dia, as turbinas eólicas chegam a possuir rotores com diâmetros superiores a 100 metros, sendo a tendência para que estas dimensões continuem a aumentar, pelo que existem situações em que as variações de velocidade do vento na área varrida pelo rotor não podem ser desprezáveis, sendo necessária a caracterização do escoamento atmosférico a diversas alturas na área de varrimento do rotor do aerogerador. Por outro lado, a montagem de uma torre de medição para uma situação destas, visto ser necessária a medição da velocidade do vento à altura do eixo do rotor da turbina, obriga a torres de dimensões cada vez maiores, o que se torna num processo muito mais complexo, dispendioso e moroso.

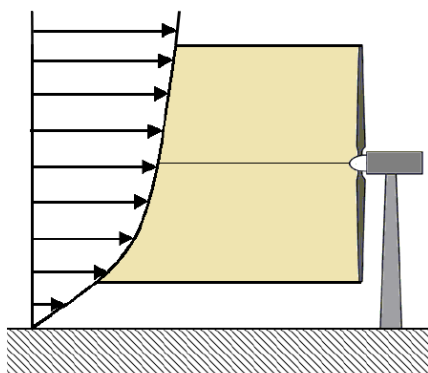


Figura 1 - Variação da velocidade horizontal do vento na área de varrimento do rotor de um aerogerador.

Uma solução encontrada para contornar estes problemas passa pela utilização de LIDARs. Estes instrumentos conseguem caracterizar o vento através da emissão de um feixe laser. Trata-se, então, de uma técnica não intrusiva, não afetando, portanto, o escoamento atmosférico, o que não se verifica com medições efetuadas com recurso a torres de medição. Estas podem ter dados comprometidos devido, por exemplo, à esteira provocada pela torre. No entanto, as capacidades mais interessantes dos LIDARs relativamente a métodos de medição convencional estão relacionadas com a versatilidade que apresentam, visto serem capazes de efetuar medições a distâncias significativamente superiores, e de não estarem presos a um local de medição, realizando medições para diferentes alturas para o mesmo local ou para locais distintos previamente designados. Adicionalmente, são também dispositivos muito mais simples de transportar e instalar, quando comparados com as torres de medição convencionais.

Apesar de todas as potencialidades que possuem, os sistemas de medição remota apenas apresentam, ainda, resultados positivos para campanhas realizadas em terreno plano. Como é

possível observar na figura 2, este tipo de terrenos já se encontram significativamente explorados no que à capacidade eólica instalada diz respeito, enquanto terrenos complexos, identificados a cor vermelha, encontram-se ainda pouco potenciados. Assim, o próximo passo, com o intuito de aumentar a capacidade de geração energética, passará pelo aumento do número de parques neste tipo de terrenos.

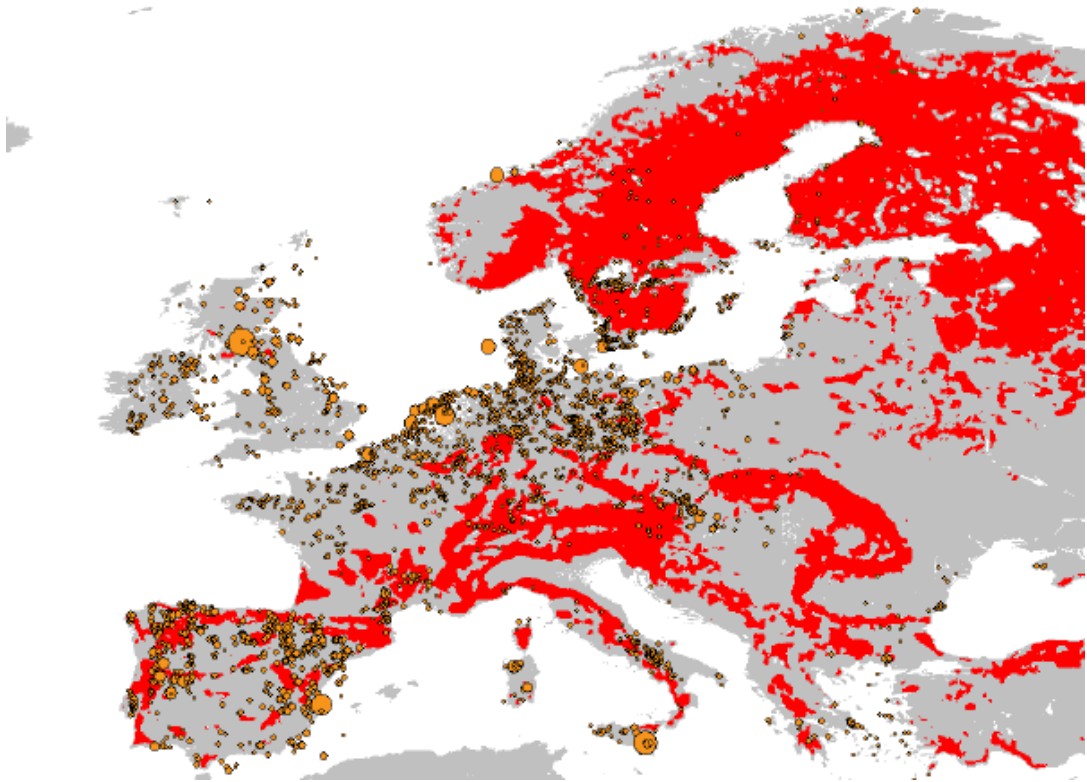


Figura 2 - Terrenos altamente complexos na Europa. Parques eólicos com capacidade entre os 3 e os 322 MW encontram-se identificados por círculos laranjas cujo diâmetro aumenta proporcionalmente com a potência instalada [1].

1.1 Enquadramento do trabalho e motivação

A evolução da indústria do aproveitamento de energia de fonte eólica obrigou ao desenvolvimento das técnicas para a medição e previsão do vento, para fazer face às limitações evidenciadas pelas técnicas convencionais. Dentro destas, o aparecimento dos dispositivos de medição remota para a caracterização do escoamento atmosférico tem ganhado uma popularidade e um apoio crescente. Tendo aparecido no mercado há cerca de apenas seis anos, é de esperar que esta popularidade continue a aumentar, podendo vir a ser o futuro da indústria eólica nos anos vindouros. Para além da indústria da energia eólica, é previsível que estas técnicas venham a interessar a outros setores de atividade e, de um modo geral, a todas as atividades relacionadas com a física da atmosfera.

A possibilidade de visita, acompanhamento e contacto com o centro operacional da experiência de campo que se encontrou a decorrer na Serra do Perdigão foi também um fator motivacional para a escolha deste tema.

1.2 INEGI

Esta dissertação foi desenvolvida com o apoio da Unidade de Energia Eólica do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, INEGI. O INEGI nasceu em 1986 no seio do que são hoje o DEMec¹ e DEGI² da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e é um instituto de novas tecnologias vocacionado para a realização de atividade de investigação e inovação de base tecnológica e transferência de tecnológica orientada para o tecido industrial.

A Unidade de Energia Eólica encontra-se em funções desde 1986. Para além de diversos contributos em projetos no estrangeiro, este departamento assume-se como uma referência a nível nacional, tendo tido participação, seja no desenvolvimento ou monitorização de parques eólicos, em cerca de 85% da capacidade eólica total instalada em Portugal.

1.3 Objetivos do trabalho

Era objetivo deste trabalho uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a performance de um sistema de medição remota LIDAR em terreno complexo, tendo como referência os valores obtidos através de anemómetros de copos e anemómetros sónicos.

A análise e processamento dos dados será efetuada com recurso a linguagem Python, comparando resultados obtidos através da instrumentação acima mencionada. Não constituindo objetivo principal, pretendia-se ainda entender de que forma as normas existentes fazem o enquadramento da utilização de sistemas de medição remota

1.4 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 são descritos os fundamentos básicos do funcionamento de diferentes tipos de LIDAR, assim como parâmetros importantes na caracterização do escoamento atmosférico.

No capítulo 3 é aprofundada a problemática das medições com este tipo de equipamento em terreno complexo, sendo ainda mencionadas algumas soluções sugeridas por construtores de forma a ultrapassar este problema.

O capítulo 4, por sua vez, debruça-se sobre a atualização da norma IEC 61400.

No capítulo 5 são descritas as duas campanhas de medição efetuadas, na Aboadela e Vale de Estrela, sendo ainda descritos os fundamentos utilizados no processamento de dados, resultados obtidos e algumas conclusões.

No capítulo 6 são debatidas as conclusões gerais da presente dissertação, assim como traçadas as perspetivas para trabalhos futuros.

Remetidos para anexo encontram-se ainda, nos anexos A e B, mapas topográficos, assim como uma esquematização da instrumentação utilizada nas campanhas de medição na Aboadela e Vale de Estrela, respetivamente.

Uma descrição dos filtros utilizados no tratamento de dados encontra-se no anexo C, enquanto nos anexos D e E são descritos os efeitos dos filtros aplicados na base de dados, para a campanha da Aboadela e Vale de Estrela. Os anexos F e G são relativos aos testes de sensibilidade realizados, e respetivos resultados. Finalmente, o anexo H é referente a uma descrição mais detalhada do Anexo L da atualização da norma IEC 61400, relativo à utilização de dispositivos de medição remota em campanhas de medição do escoamento atmosférico.

¹ Departamento de Engenharia Mecânica

² Departamento de Engenharia e Gestão Industrial

2 Medição da Velocidade do Vento

Tradicionalmente, a indústria da conversão da energia do vento recorre à utilização de anemômetros de copos para a caracterização de escoamentos atmosféricos. Os anemômetros ultrassônicos são também crescentemente utilizados, quer na avaliação do potencial eólico, quer no acompanhamento do funcionamento de aerogeradores e parques eólicos. São, pois, os resultados obtidos a partir destas tecnologias a referência quando se encara a possibilidade de recorrer a outras soluções para a medição dos parâmetros característicos dos fenómenos atmosféricos. Contudo, estas soluções têm também os seus inconvenientes e limitações. A necessidade de medição a alturas cada vez maiores obriga à instalação de torres de medição de grandes dimensões, o que se traduz num processo mais dispendioso, moroso e complexo. As medições efetuadas com sistemas de medição remota, embora recorram a sistemas mais caros e com maior incerteza, são de mais simples e rápida instalação, e podem efetuar medições a maiores alturas do que as torres de medição convencionais.

2.1 Caracterização do escoamento atmosférico

O aumento sistemático das dimensões dos aerogeradores faz com que parâmetros como o “*wind shear*”, “*wind veer*” ou intensidade de turbulência, devido à sua influência na performance e vida útil das máquinas, não possam ser ignorados. Estas são importantes propriedades na medição do recurso eólico, tendo em vista a implementação de um futuro parque eólico.

O perfil de velocidades do vento num determinado local, tende, geralmente, a exibir velocidades mais baixas em alturas mais próximas do solo, e mais elevadas à medida que nos afastamos deste. Esta diferença de velocidades é designada por “*wind shear*”. A velocidade do vento a uma determinada altura pode ser estimada em função da altura ao solo (z), entre outras aproximações, pela lei de potência mostrada na equação 1. A velocidade de referência (V_{ref}) é uma velocidade conhecida à cota z_{ref} [2].

$$V(z) = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

O “*wind shear*” pode ser quantificado através do expoente α , denominado “*shear factor*”. Este conceito foi definido no ano de 1960 pela publicação de *Davenport* [3] e é geralmente aceite para propósitos relacionados com a engenharia do vento. O coeficiente α é facilmente calculado a partir de medições de velocidade a duas alturas distintas através da equação 2 [2].

$$\alpha = \log \left(\frac{u(z_2)}{u(z_1)} \right) / \log \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \quad (2)$$

Devido à sensibilidade da escala logarítmica é importante que a diferença de alturas utilizada para a aferição do *shear factor* seja a mais elevada possível. O expoente α aumenta com o aumento da rugosidade da superfície e diminui com o aumento da média das velocidades, refletindo a tendência de estabilização da velocidade com a altura a.n.s.³ [2].

Por sua vez, o “*wind veer*” classifica a variação da direção do vento ao longo do perfil de velocidades. Uma vez que o LIDAR também permite medir a direção do escoamento

³ Acima do nível do solo

atmosférico às alturas pretendidas, um só aparelho será capaz de determinar o “*wind veer*” local [5].

Por fim, a intensidade de turbulência é definida na equação 3:

$$TI_{1sec} = \frac{\sqrt{\langle v_r'^2 \rangle_{1sec}}}{u_{1sec}} \quad (3)$$

Onde:

- $\langle v_r'^2 \rangle_{2\pi}$ é a variância da velocidade para 1 rotação (2π), sendo $\sqrt{\langle v_r'^2 \rangle_{2\pi}}$ o desvio padrão.
- u_{1sec} é a velocidade média para o tempo de 1 rotação (considerando, 1 rotação por segundo)

Este parâmetro também pode ser obtido com o desvio-padrão médio para mais de uma rotação. Nesta situação, também a velocidade média passaria a ser a média calculada no intervalo de tempo decorrido entre as diversas rotações [5].

O aumento da dimensão das turbinas eólicas faz com que estas características ganhem uma importância cada vez maior, tanto a nível do aproveitamento energético feito pela máquina, como da sua vida útil, pois ajudam a perceber os esforços que uma máquina irá estar sujeita, pelo que a sua determinação ganha um relevo cada vez mais acentuado. Para ser possível realizar esta análise com recurso a anemómetros, é necessária a instalação destes a diversas alturas (pelo menos duas). Adicionalmente, os dispositivos de medição remota são uma tecnologia não intrusiva. Nas torres de medição, a própria torre criará um efeito de esteira que comprometerá as medições para algumas direções

2.2 Campanha de medição com recurso a LIDARs

Como foi referido anteriormente, a implementação de uma campanha de medição recorrendo a LIDARs é muito mais simples e rápida do que a instalação de torres de medição convencionais.

Existem diversos modos para se implementar uma campanha de medição com recurso a LIDARs. Estes podem ser instalados em solitário, em conjunto com uma torre de medição ou ainda como uma estação móvel.

A instalação completamente independente de um LIDAR pode providenciar dados aceitáveis se este possuir ruído muito reduzido, caso o sistema rejeite dados errados de maneira satisfatória, e se o terreno onde a campanha decorre for razoavelmente plano ou em offshore. No entanto, é quase certa a necessidade de uma verificação do sistema numa estação de medição conhecida, antes do início da campanha de medição. Uma verificação no final da campanha adicionará também maior confiança nos resultados obtidos.

A utilização de LIDARs acompanhados por uma torre de medição, além de fornecer uma base de dados de referência segundo a qual os dados do LIDAR podem ser verificados, ajudará também a melhorar a qualidade das medições de referência obtidas. Através da comparação de resultados de ambas as tecnologias, é possível revelar os efeitos da esteira provocada pela torre de medição nos copos, detetar gelo ou defeitos na instrumentação convencional [10].

A utilização de LIDARs como estação móvel consiste na movimentação do LIDAR para diferentes localizações, durante alguns meses, juntamente com uma torre meteorológica. Assim, é possível aceder à variação espacial do vento num local de grande escala, utilizando

apenas um LIDAR e uma torre meteorológica. No entanto, seria preferível a utilização de vários LIDARs simultaneamente em diferentes locais [6].

Para além da utilização dos LIDARs no solo, com o objetivo de se obter o perfil de velocidade local, existe ainda a interessante possibilidade destes dispositivos serem montados na nacelle de um aerogerador. Nesta situação, o LIDAR mede sempre o vento “*upwind*”⁴, o que não acontece com a torre de medição nem com LIDARs instalados no solo, que para determinadas direções e sentidos do escoamento, acabam por medir o vento após a passagem deste pela turbina eólica, sendo as medições afetadas pelo efeito de esteira desta, como se encontra ilustrado na figura 3. Assim, as velocidades calculadas por um LIDAR instalado na nacelle de um aerogerador não possuem restrições relativas a sectores de medição.

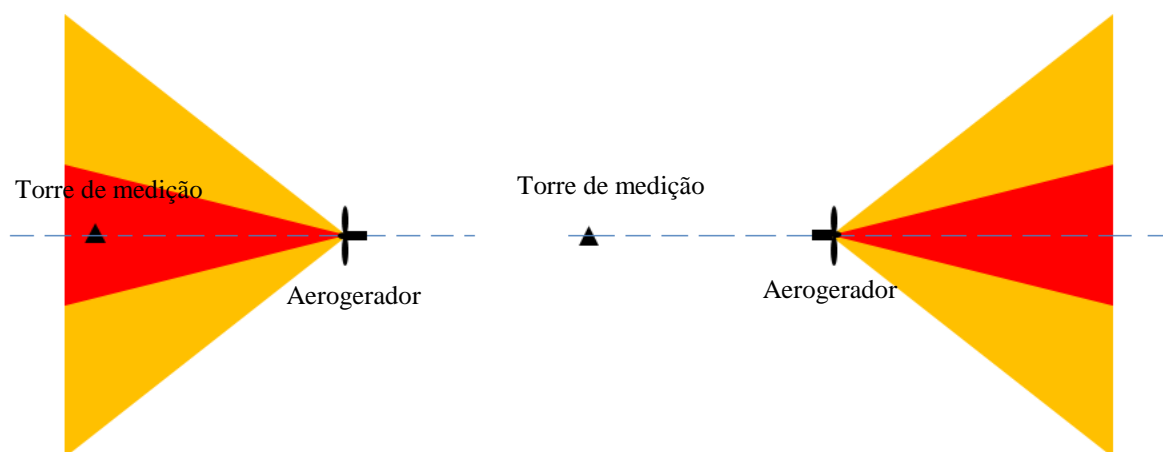


Figura 3 – A vermelho, medição sempre “*upwind*” de um LIDAR instalado na nacelle de um aerogerador, e a amarelo setores que serão influenciados pela presença do aerogerador.

Outra atraente possibilidade deste tipo de instalação é a antecipação a possíveis alterações nas características do escoamento atmosférico. Por outras palavras, a medição do vento a montante da turbina, a uma distância considerável, permitiria à turbina “preparar-se” para qualquer alteração que o escoamento sofra, direção e velocidade por exemplo, alterando o pitch das pás para uma alteração da velocidade do vento, e/ou rodando o rotor de maneira a encarar o escoamento de frente, diminuindo o “*yaw error*”, para uma futura alteração da direção do vento. O “*yaw error*” é o desalinhamento da turbina face ao escoamento atmosférico. Este desalinhamento tem como resultado um menor rendimento energético, podendo ainda ter consequências no que diz respeito ao desgaste estrutural da turbina. Deste modo, cada turbina melhoraria a sua performance energética e necessitaria também de menor manutenção devido ao menor desgaste exercido por estas solicitações indesejáveis.

A implementação de LIDARs na nacelle de aerogeradores possibilita também a medição de parâmetros específicos do escoamento atmosférico, como, por exemplo, turbulência criada por uma turbina eólica. Para isto basta orientar o LIDAR de maneira a que apenas efetue medições do vento “*downwind*”⁵. Esta perspetiva pode permitir uma caracterização mais detalhada do escoamento atmosférico e a uma compreensão mais aprofundada da influência do aerogerador no mesmo.

⁴ Vento a montante

⁵ Vento a jusante

Apesar da maior simplicidade e rapidez de instalação, os sistemas LIDAR sofrem de alguns problemas práticos. O maior deles é, geralmente, encontrar uma boa fonte de energia. Esta deve ser económica, confiável e adequada às condições locais (risco de incêndio, risco de congelação, ...). Também a medição em condições de intensa radiação solar pode ser um problema, uma vez que pode levar ao sobreaquecimento do equipamento, condicionando assim a campanha de medição. Outro problema prende-se com a segurança do equipamento, pois são sistemas bastante dispendiosos. Finalmente, a comunicação da informação recolhida é um fator também ele importante. A falta de dados devido a falhas de comunicação pode ser muito prejudicial para o projeto global. Uma boa comunicação dos dados recolhidos ajuda o projeto de duas maneiras: faz com que a informação seja recolhida e fornece sinais prematuros de falhas do sistema. 3G e sistemas de satélite funcionam bem e não são muito dispendiosos [6].

Apesar das inegáveis vantagens da tecnologia LIDAR e da grande contribuição que pode dar para a caracterização do escoamento atmosférico e, consequentemente, do recurso eólico, não existe, por enquanto, um procedimento standard para a avaliação do recurso eólico com LIDARs. Este facto, aliado à ainda baixa confiança nos resultados, tem como consequência a dificuldade de reconhecimento do uso desta tecnologia, nomeadamente nas operações de financiamento de projetos de parques eólicos.

2.3 Efeito Doppler

Os sistemas de medição remota LIDAR medem a velocidade radial de partículas presentes no escoamento atmosférico através do efeito Doppler. O sinal emitido pelo LIDAR é um feixe de luz coerente, com uma frequência bem definida e conhecida, incide sobre as partículas em movimento, as quais reencaminham o sinal para o LIDAR com uma frequência alterada. O fenómeno encontra-se ilustrado na figura 4. Esta nova frequência é então comparada com uma cópia exata da frequência inicial, obtendo-se assim uma diferença de frequências, denominada frequência de Doppler. Esta diferença de frequências é proporcional à velocidade radial à qual as partículas se deslocam no escoamento atmosférico, como mostra a equação 4 [6].

$$\Delta f = f_B - f_E = \frac{2f_E}{c} v_r \quad (4)$$

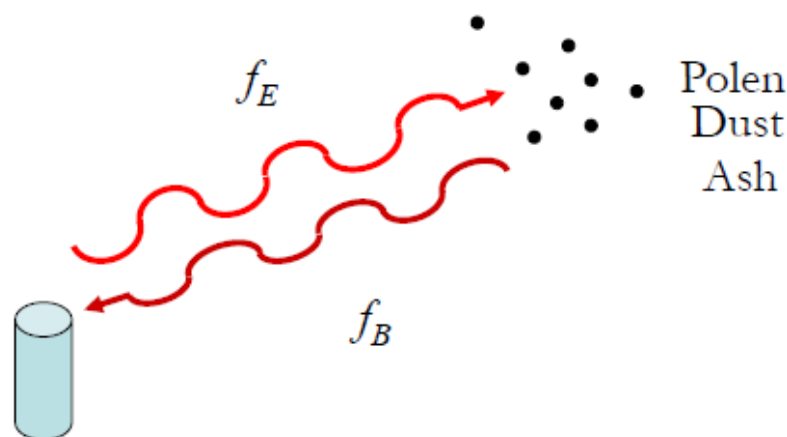


Figura 4 - Frequência de Doppler [6].

A velocidade radial é a velocidade que a partícula possui na direção do sinal emitido pelo LIDAR, ou seja, a velocidade com que a partícula se aproxima ou afasta do equipamento. Assim, para um determinado azimuth do escoamento, o LIDAR calculará dois valores extremos. Uma vez que o LIDAR apenas consegue medir velocidade absolutas, estes dois

valores extremos serão positivos. Quando o escoamento é perpendicular ao sinal emitido, o que acontece também em dois pontos desfasados de 180° um do outro, e a 90° dos valores extremos, a velocidade radial calculada será nula. As velocidades radiais, para um determinado escoamento atmosférico, encontram-se ilustradas na figura 5. Também é recorrente a velocidade radial ser denominada de v_{LOS} ⁶ [6].

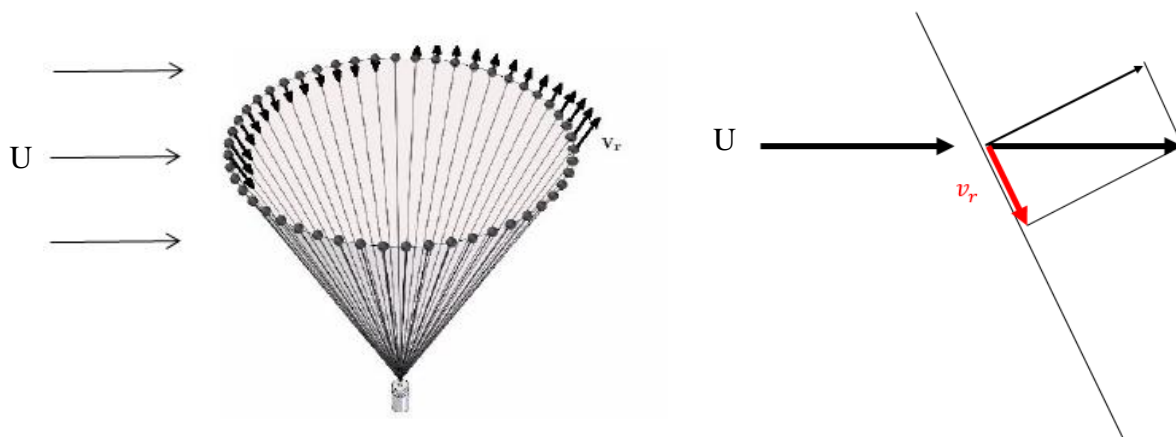


Figura 5 - Velocidades radiais de um escoamento atmosférico [1].

2.4 Tecnologia LIDAR

Como foi referido, a tecnologia LIDAR utiliza o efeito Doppler para a medição da velocidade do escoamento atmosférico. A frequência obtida através deste efeito contém muito ruído, sendo, por isso, difícil extrair informação do espectro. Por esta razão, esta frequência é sujeita a uma transformada de Fourier, e, fazendo uma média dos espectros obtidos, obtém-se o espectro de Doppler. A partir deste espectro conseguimos estimar a velocidade radial para o local de medição pretendido. Para se obter o vetor velocidade 3D, combinam-se as velocidades radiais obtidas em três direções diferentes. Idealmente, isto seria concretizado cruzando 3 feixes laser no ponto de medição. No entanto, como o LIDAR analisa o escoamento conicamente, o vetor 3D é derivado de velocidades radiais obtidas em diferentes pontos, à mesma altura, o que se encontra ilustrado na figura 6.

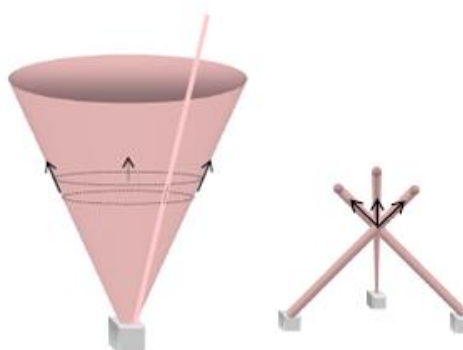


Figura 6 - Cone de medição do LIDAR e situação ideal obtenção do vetor 3D.

A tecnologia LIDAR fez a sua primeira aparição no mercado em 2006, através do modelo *ZephIR*, da empresa britânica *QinetiQ*. O *ZephIR* é um LIDAR de feixe contínuo, ou seja, no

⁶ “Line of Sight Velocity”

decorrer da medição o equipamento emite constantemente um sinal laser. Já em 2007 surgia o *Windcube*, da empresa francesa *Leosphere*, sendo este, contrariamente ao seu antecessor, um LIDAR de feixe pulsado. Neste caso, como o próprio nome indica, o sinal laser é enviado sob a forma de pulsos finitos para o escoamento que se pretende estudar. Estes equipamentos de medição remota para medição do vento são uma tecnologia ainda recente, pelo que ainda existem muitas limitações quanto à sua utilização e pouca confiança relativa à fiabilidade aos resultados obtidos [7].

Os LIDARs podem, então, ser de dois tipos distintos: LIDARs de feixe contínuo ou LIDARs de feixe pulsado.

2.5 LIDAR de Feixe Contínuo

Como o nome indica, este tipo de LIDAR emite o feixe laser ininterruptamente, em que a lente emissora está em constante rotação, levando o feixe laser a efetuar uma trajetória cônica. Este feixe é emitido com um ângulo de cone de 30° segundo a vertical, com recurso a um prisma que roda completando uma rotação por segundo.

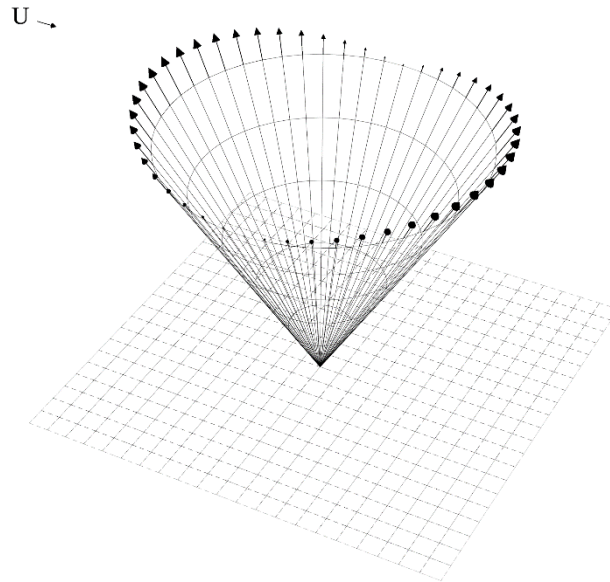


Figura 7 - Análise cônica ao escoamento efetuada pelo LIDAR ZephIR [1].

Na análise cônica do escoamento, a velocidade radial do vento, combinada com o ângulo de azimute da análise, θ , são inseridos na equação 5,

$$v_r(\theta) = |A \cos(\theta - \theta) + B| \quad (5)$$

onde,

$$U = \frac{A}{\sin \phi} \quad (6)$$

$$w = \frac{B}{\cos \phi} \quad (7)$$

Em que θ é a direção do vento, tirada com uma ambiguidade de 180°, que pode ser identificada a partir do mastro meteorológico existente no LIDAR. Caso o LIDAR não possua este mastro, são necessárias medições relativas à direção do vento [1].

Para medições efetuadas a grandes alturas acima do nível do solo, esta ambiguidade de 180° no azimute do escoamento, caso não se possua uma torre de medição de dimensão considerável, pode levar a azimutes desfasados de 180°. Isto acontece quando existem vento com sentidos

opostos a diferentes altitudes. Um exemplo deste erro poderia acontecer em medições efetuadas em terreno complexo, no qual pode haver a ocorrência de zonas de recirculação no local onde o LIDAR se encontra instalado, como se encontra ilustrado na figura 8. Nestes casos, o vento existente no local onde se encontra o mastro do LIDAR pode possuir sentidos completamente opostos àquele que o escoamento atmosférico possui.



Figura 8 - Zona de recirculação de um escoamento atmosférico.

O feixe emitido pelo LIDAR é focado para a distância à qual se pretende efetuar a medição, onde os aerossóis presentes no escoamento atmosférico o refletem de volta para o instrumento de medição, obtendo-se assim uma medição da velocidade radial do vento.

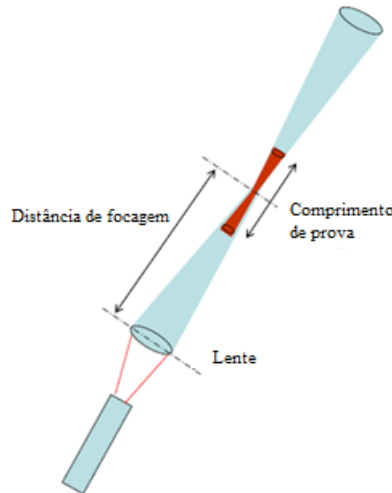


Figura 9 - Emissão e focagem do feixe laser [6].

Uma particularidade destes sistemas é o facto de efetuarem medições num volume de prova de muito maior dimensão do que as medições levadas a cabo com anemómetros. Por esta razão existem limitações para a comparação de resultados com aqueles obtidos com recurso a anemómetros. O volume de prova aumenta de forma acentuada com o aumento da distância de medição, o que leva a resultados mais dispersos, como se pode verificar na Tabela 1. Para um LIDAR de feixe coerente contínuo, o volume de integração é obtido através da distribuição de energia ao longo do feixe, a qual pode ser aproximada através de uma distribuição Lorentziana:

$$\varphi(s) = \frac{1}{\pi} \frac{Z_R}{Z_R^2 + (s - r)^2} \quad (8)$$

Onde s é a distância ao ponto de focagem ao longo do feixe laser, r é a distância de focagem ou alcance e Z_R é o comprimento de Rayleigh. O comprimento de prova é geralmente definido como sendo $2Z_R$. Para os *ZephIR* LIDARs, o comprimento de Rayleigh foi estimado como sendo aproximadamente $Z_R = 0,0013r^2$ [5].

Assim, os LIDARs de feixe contínuo apresentam resultados muito bons para medições a pequenas distâncias, mas estão limitados a medições até cerca de 150 metros, devido ao aumento acentuado do comprimento de prova, e consequentemente, do volume de prova para distâncias superiores. De referir ainda que estes sistemas apresentam uma distância mínima de medição na ordem dos 10 metros [6].

Tabela 1 - Distâncias de medição e correspondente comprimento de prova [6]

Distância de medição [m]	Comprimento de prova [m]
10	0,23
50	5,7
100	22,8
150	51,4
200	91,4

Uma grande desvantagem dos LIDARs de feixe contínuo é o facto de apenas conseguirem efetuar medições para uma altura de cada vez, sendo cada uma destas analisada durante 1 a 3 segundos. Assim, quanto maior o número de alturas em estudo, maior será também o tempo necessário para o sistema devolver o perfil de velocidades do vento do local.

Outra limitação destes sistemas é a impossibilidade de efetuar medições em determinadas condições de chuva e de nebulosidade. Nestes casos, a medição fica comprometida uma vez que o sinal, ao invés de ser reencaminhado para o LIDAR pelas partículas presentes no vento, é reencaminhado pela chuva ou pelas nuvens, calculando-se a velocidade destas em vez da velocidade do escoamento atmosférico. Para determinar o fenómeno da nebulosidade efetuam-se duas medições, uma a pequena e outra a grande altura, acima das nuvens (geralmente a 38 e 800 metros), para com estas se decidir o quão significativa é a influência das nuvens na medição [6].



Figura 10 - ZephIR LIDAR [8].

2.6 LIDAR de Feixe Pulsado

Estes LIDARs, contrariamente ao que acontece com os de feixe contínuo, emitem pulsos de luz finitos, intermitentemente, efetuando medições à velocidade e direção do escoamento em pontos separados por 90°. Cada setor é analisado durante 1 segundo, sendo que a cada 6 segundos os valores obtidos são utilizados para calcular a velocidade e direção do vento local.

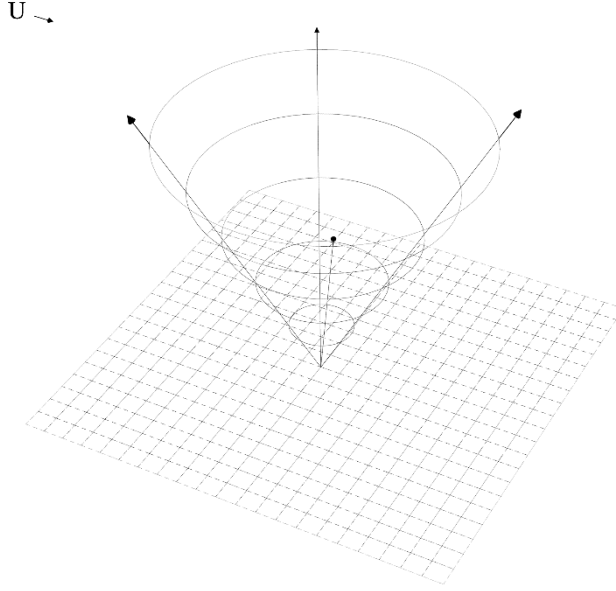


Figura 11 - Análise cônica ao escoamento efetuada pelo LIDAR Windcube [1].

As velocidades do escoamento, neste tipo de LIDARs, são obtidas através da equação 9,

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (9)$$

onde u_1 e u_2 são as componentes horizontais da velocidade do vento, calculadas a partir das equações 10 e 11,

$$u_1 = \frac{v_r(0) - v_r(\pi)}{2 \sin \phi} \quad (10)$$

$$u_2 = \frac{v_r\left(\frac{\pi}{2}\right) - v_r\left(\frac{3\pi}{2}\right)}{2 \sin \phi} \quad (11)$$

e,

$$w = \frac{v_r(0) + v_r(\pi)}{2 \cos \phi} = \frac{v_r\left(\frac{\pi}{2}\right) + v_r\left(\frac{3\pi}{2}\right)}{2 \cos \phi} \quad (12)$$

$$\theta = \arctan(u_1, u_2) \quad (13)$$

De referir que é conveniente ser efetuada uma média das duas equações existentes para a componente vertical da velocidade, w .

Em LIDARs de feixe pulsado, o tempo de chegada do feixe laser indica-nos de onde este foi reencaminhado. O feixe atinge a partícula à distância $r_1 = ct_1$, e retornará ao LIDAR após $2t_1$, sendo c a velocidade de propagação do laser (velocidade da luz), t_1 o tempo de chegada do feixe à partícula presente no escoamento e r_1 a distância à qual a mesma se encontra.

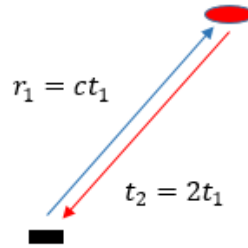


Figura 12- Funcionamento de um LIDAR de feixe pulsado.

Na realidade, o pulso tem duração finita de T_p . Assim, um sinal devolvido à distância $ct/2$ pode ser detetado durante T_p . É por esta razão que se analisam os sinais devolvidos durante um período de tempo, normalmente T_p . Esta técnica é denominada “*range-gating*”. Com esta técnica, o LIDAR é capaz de efetuar medições a diversas alturas simultaneamente, sendo estas determinadas a partir do tempo que o sinal demora a regressar ao equipamento. Esta capacidade de analisar múltiplas distâncias simultaneamente é a principal vantagem face aos LIDARs de feixe contínuo, obtendo-se, desta maneira, o perfil de velocidades do local com maior rapidez.

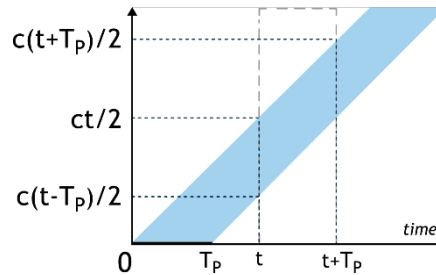


Figura 13 – Período de análise dos sinais devolvidos por *range-gating* [6].

Estes LIDARs, contrariamente àquilo que se verifica nos de feixe contínuo, possuem uma resolução vertical constante para qualquer distância. No entanto, o que limita a distância de medição neste tipo de sistema é o sinal que é devolvido pelas partículas ao LIDAR, que diminui segundo $1/r^2$, sendo r a distância de medição. Caso se pretenda aumentar a distância máxima de medição, pode-se aumentar o comprimento de pulso, aumentando assim o sinal devolvido pelas partículas. Esta solução vai, no entanto, diminuir a resolução vertical da medição.

Estes sistemas não podem efetuar medições a distâncias inferiores a 40 metros. Isto deve-se ao facto de, quando o laser é acionado, e antes de este atingir a janela do LIDAR, o valor medido não é nulo, sendo por isso denominado ruído. Quando o feixe laser atinge a janela, como a transmissividade desta não é perfeita, há luz que é refletida, sendo que o LIDAR terá nesta zona um “pico” de sinal recebido. O ruído e pico de sinal encontram-se ilustrado na figura 14. Por esta razão, e sendo conhecida a velocidade do feixe laser, e de maneira a que este atinja as partículas existentes no escoamento atmosférico e volte para o LIDAR numa zona em que este possa fazer uma medição correta dos valores recebidos, a distância a ser medida tem de ser pelo menos de 40 metros [6].



Figura 14 - Ruído medido e reflexão do sinal laser na janela do LIDAR [6].

Em situações de nebulosidade, as medições em feixe pulsado também são afetadas. Para casos em que a altitude da medição seja superior à altitude a que a nuvem se encontra, os resultados não apresentam viés, e apresentam CNR^7 reduzido. O CNR define-se como a razão entre a intensidade do sinal recebido pelo sistema e o ruído de fundo. Elevados valores de CNR indicam boa qualidade de recepção do sinal, enquanto baixos valores indicam o oposto. Para casos em que a medição se efetue ao nível das nuvens, os resultados apresentaram viés e elevado CNR. Para casos em que a altitude da medição seja inferior à altitude da nuvem, a nebulosidade não afetará as medições.

Este tipo de LIDAR tem ainda a vantagem adicional, relativamente aos LIDARs de feixe contínuo, de poder variar o ângulo de cone no qual o feixe de luz é emitido de 30° para 15°. Esta possibilidade será discutida no capítulo 3.1 da presente dissertação.



Figura 15 – Windcube [9].

⁷ “Carrier-to-noise ratio”

2.7 WindScanners

Mais recentemente surgiram os *WindScanners*. Um sistema *WindScanner* é constituído por dois ou mais LIDARs, colocados em posições distintas, sendo controlados ou coordenados por um computador “mestre”. A primeira geração de LRWS⁸ e de SRWS⁹ nasceu dos LIDARs comercialmente disponíveis *Windcube* 200 e *ZephIR*, respetivamente [11].

Os *WindScanners* são programados para realizar determinadas trajetórias num determinado intervalo temporal, definidos pelo utilizador. Estas trajetórias, conhecidas como trajetórias complexas, podem ser independentes ou sincronizadas com outros *WindScanners*. Um único LRWS consegue adquirir a velocidade radial a 500 diferentes distâncias em cada LOS¹⁰ simultaneamente, a uma frequência máxima de 10 Hz. Um único SRWS é capaz de medir a velocidade radial a apenas uma distância de cada vez, mas com frequência máxima de 400 Hz.

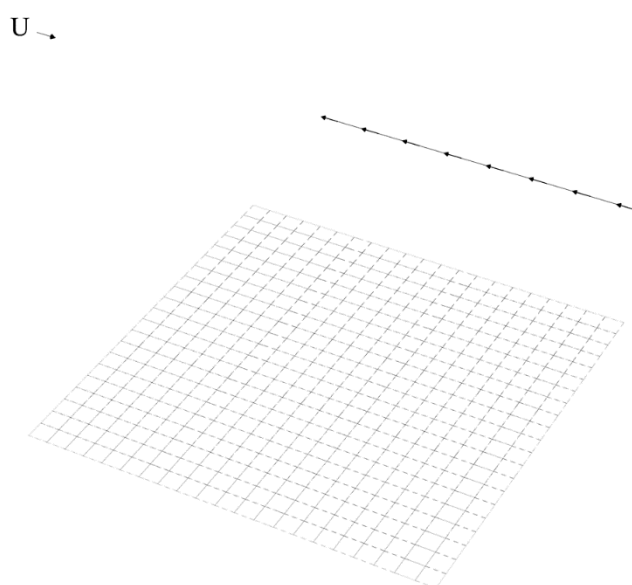


Figura 16 – Trajetória complexa de um *Windscanner* [1].

Os sistemas LRWS estão em operação desde 2013, estando geralmente conectados com o computador “mestre” utilizando um sistema 3G. Estes sistemas de longo alcance têm como objetivo medir o escoamento num grande volume de medição na atmosfera.

Os sistemas SRWS estão em operação já desde 2011, podendo estar conectados ao computador “mestre” através de fibra ótica, sendo controlados através de uma interface digital MACRO¹¹, tendo como objetivo, geralmente, realizar medições de pequena escala relativas à turbulência em torno de uma turbina eólica [11].

Com *WindScanners*, a possibilidade de medição de parâmetros específicos do escoamento atmosférico, como a turbulência criada por uma turbina eólica, é alargada a dispositivos instalados no solo, graças à maior liberdade de movimentos que estes possuem.

⁸) “Long-Range WindScanner”

⁹ “Short-Range WindScanner”

¹⁰ “line of sight”

¹¹ “Motion and Control Ring Optical”



Figura 17 - SRWS (esquerda) e LRWS (direita) [4].

3 Utilização de LIDARs em Terreno Complexo

Como foi já referido, um dos maiores desafios enfrentados pelos sistemas de medição remota é superar a fraca performance até agora evidenciada em campanhas de medição em terreno complexo.

Classifica-se como terreno complexo um local à volta do qual existem variações orográficas significativas e/ou com obstáculos que provoquem alterações no escoamento atmosférico. Na figura 18 encontram-se ilustradas as diferentes classes de rugosidade e tipos de terreno, de acordo com a classificação da EWA¹².

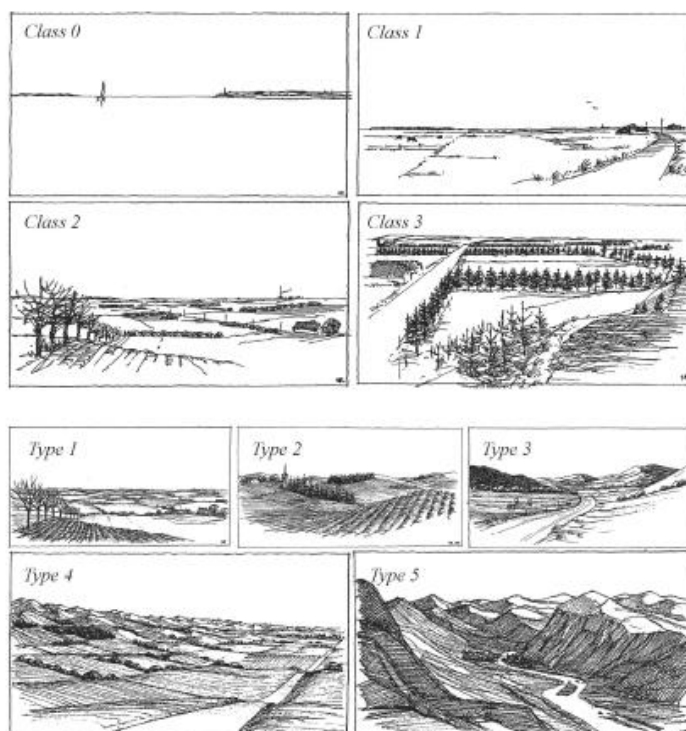


Figura 18 - Exemplos de terrenos correspondentes às classes de rugosidade e tipos de orografia do EWA [1].

Um terreno é definido como sendo plano quando o escoamento acima deste pode ser considerado homogéneo. Na classificação do EWA, as classes de rugosidade 0, 1 e 2 são consideradas como sendo terreno plano. Qualquer combinação de terreno do tipo 1 com as classes de rugosidade 0, 1 ou 2 é também definida como sendo terreno plano.

O EWA sugere também que todas as áreas urbanas e zonas florestadas sejam colocadas numa única classe. No entanto, e seguindo a classificação efetuada por *Bingöl, F.*, consideremos duas subclasses, terreno moderadamente complexo e terreno complexo [1]. O primeiro caso, terreno moderadamente-complexo, engloba terrenos acidentados não florestados. Nestas localizações, é a orografia local que tem a maior influência sobre o escoamento atmosférico. Locais com elevação máxima de 100 m, possuindo declive entre 5° e 10° são considerados moderadamente complexos. O EWA associa este tipo de terrenos aos tipos 1 e 2.

¹² “European Wind Atlas”

Terrenos planos com vegetação escassa e de baixo porte, cuja altura se encontra entre os 5 e 10 metros, também são classificados de terreno moderadamente complexo [14]. Estes locais são classificados como sendo de tipo 2 ou 3, segundo o EWA. Os efeitos da vegetação no escoamento atmosférico são semelhantes àqueles observados em terrenos acidentados não florestados, razão pela qual estes terrenos também foram considerados de moderadamente complexos.

Quando as elevações são mais pronunciadas, como em montanhas ou colinas, ou a vegetação se torna mais densa e alta (florestas), o efeito no escoamento será mais evidente, sendo o local classificado de terreno complexo. Quando o declive da variação orográfica é superior a 10°, o terreno em causa influenciará de maneira mais pronunciada o escoamento atmosférico. Nestas situações, o vento poderá separar-se do terreno criando locais de recirculação. A rugosidade destes locais não difere dos locais moderadamente-complexos se não houver vegetação alta e então o terreno é equivalente aos tipos 4 e 5 da classificação do EWA.

Para casos onde a vegetação tem uma altura superior a 10 metros, esta tem um efeito dominante sobre o escoamento. Se o local apresentar variações bruscas de altura da vegetação ou de rugosidade, o escoamento irá sofrer alterações semelhantes àquelas observadas em terreno complexo, mesmo que as vizinhanças sejam compostas por terrenos planos. A rugosidade de uma floresta é muito mais complicada de ser determinada e difere dependendo do tipo de vegetação presente e da própria velocidade do vento.

Por fim, *Bingöl, F.* define ainda como terrenos altamente complexos aqueles que incluam qualquer combinação de características de terrenos moderadamente complexos ou complexos. Tais terrenos estão identificados a vermelho na figura 2 [1].

Com o desenvolvimento da indústria da energia eólica, e com a crescente procura de novos locais para o aumento da capacidade eólica instalada, os terrenos complexos conheceram uma maior importância, sendo, ainda hoje, a caracterização do recurso eólico nessas condições um dos maiores desafios à continuação do crescimento do setor.

3.1 Ângulo de Emissão do Feixe Laser

Em terrenos complexos ou altamente complexos, com já foi referido, o escoamento pode não ser homogêneo. A existência de vento com componente vertical de velocidade não nula leva a resultados de velocidade radial pouco precisos, podendo originar um viés muito elevado nos resultados obtidos. Uma das possíveis soluções para esta limitação, apresentada pelo fabricante de LIDARs *Leosphere*, passa pela utilização de um ângulo de cone mais reduzido

O erro causado pela localização do LIDAR em terreno complexo pode ser ilustrado na figura 19. A velocidade horizontal do vento, U , é, neste caso, uniforme, mas considera-se que a velocidade vertical, w , varia linearmente à medida que o escoamento é afetado pelas características orográficas (parametrizado com um fator ϕ). A aproximação do vento face ao obstáculo (“*upwind*”) leva ao aparecimento de uma componente vertical positiva, enquanto o afastamento deste (“*downwind*”) origina vento com componente vertical negativa. As velocidades do vento em *upwind* e *downwind* são calculadas através das equações 14 e 15.

$$v_{up} = (U + h\phi) \sin \phi \quad (14)$$

$$v_{down} = -(U + h\phi) \sin \phi \quad (15)$$

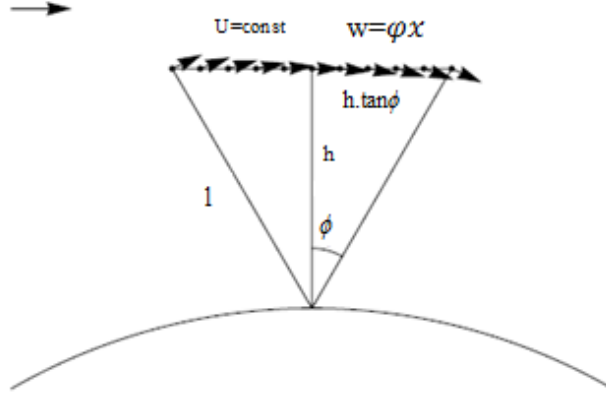


Figura 19 - Componentes verticais da velocidade do vento na passagem por um obstáculo [1].

Assumindo não homogeneidade horizontal, a velocidade horizontal pode ser calculada sendo

$$U_{LIDAR} = \frac{v_{up} - v_{down}}{2 \sin \phi} = U + h\phi \quad (16)$$

Isto mostra que, nos casos em que ϕ é negativo, existirá uma subestimativa na velocidade horizontal obtida, e uma sobrestima quando ϕ for positivo [2]. Uma análise tridimensional do erro é estudada em *Bingöl et al.*, onde se assume que o campo de velocidades médias $\mathbf{U}=(u,v,w)$ varia linearmente[13]. Assim, o vetor velocidade do vento é composto por:

$$u_{LIDAR} = u + h \frac{\partial w}{\partial x} \quad (17)$$

$$v_{LIDAR} = v + h \frac{\partial w}{\partial y} \quad (18)$$

$$w_{LIDAR} = w - \frac{l}{2} \tan^2 \phi \frac{\partial w}{\partial z} \quad (19)$$

onde l é a distância de focagem $h/\cos\phi$. A equação 19 mostra-nos ainda que o erro devido à não homogeneidade do escoamento desaparece da componente vertical da velocidade quando o ângulo de emissão do feixe, ϕ , é zero. Os erros na medição da componente horizontal da velocidade são independentes de ϕ [1].

Os resultados obtidos por *Bingöl, F.* mostraram que as medições da velocidade horizontal não foram afetadas pela variação do ângulo cônico. Assim, concluiu-se que um menor ângulo cônico ($\phi=15^\circ$) não ajuda a melhorar a medição da velocidade horizontal do vento em terreno complexo. Adicionalmente, medições levadas a cabo com este ângulo apresentaram um viés ainda mais elevado, quando comparadas com medições efetuadas com um ângulo de cone tradicional ($\phi=30^\circ$), para todos os outros termos mensurados. Assim, um ângulo de 30° é recomendado para terreno complexo, enquanto um de 15° apenas deve ser utilizado para evitar obstáculos próximos, caso seja necessário [1].

3.2 RIX (“Ruggedness Index”)

Existem vários parâmetros utilizados com o intuito de mitigar a influência, ou perceber em que amplitude esta acontece, do terreno nas medições efetuadas. Entre estes parâmetros encontramos o RIX.

O RIX de um determinado local é definido como sendo a fração do terreno circundante mais íngreme que um declive previamente designado, denominado declive crítico. Na prática, o RIX é calculado para cada raio originário do local de medição. Por exemplo, para um caso no qual o RIX de um setor de 30° ser calculado a partir de 6 perfis radiais semelhantes (subsetores), o RIX global para o local será então derivado de 72 perfis ($360/30=12$, $12 \times 6=72$) [10].

O valor do RIX dependerá da dimensão da área em análise (raio) e do declive limite. Estando na posse destes valores, o índice é facilmente calculado, indicando um valor de “*ruggedness*” para o local específico em questão.

A configuração padrão para o cálculo do RIX está indicada na tabela 2.

Tabela 2 - Valores padrão para o cálculo do RIX

Variável	Valor
Raio [m]	3500
Declive Crítico	0,3
Número de Setores	12
Número de Subsetores	6

Com esta configuração, caso o RIX seja igual a 0%, todos os declives do local são inferiores a 0.3, e o escoamento, provavelmente, seguirá a superfície terrestre. Para situações em que o RIX é $>0\%$, existem locais com declive superior a 0.3, sendo que o escoamento poderá sofrer separação em diversos sectores.

O RIX tem sido usado para a validação do uso de alguns modelos de escoamento atmosférico na indústria da energia eólica. Grandes valores de RIX irão levar a grandes erros na previsão das características do escoamento. No entanto, a precisão da previsão dependerá da relação entre os dois locais em análise, o local que está a ser analisado e o local para o qual se pretende aplicar a previsão (por exemplo, o local onde se efetuam as medições para a instalação de uma turbina eólica e o local no qual a turbina será instalada). Se ambos se encontrarem em locais igualmente acidentados, com o RIX semelhante entre eles, os erros de modelação podem ser significantes, mas semelhantes em magnitude. Para o caso de o local de medição ser mais acidentado que o local no qual se pretende “aplicar” a previsão, a utilização do RIX previsto nas medições poderá levar a uma subestimativa do recurso eólico. Caso se verifique o oposto, a previsão será, possivelmente, sobrestimada.

Posteriormente nesta dissertação, o desvio entre as medições de referência e do LIDAR será analisado em função do RIX. Esta análise permitirá perceber se este parâmetro pode, ou não, estar diretamente associado ao erro ocorrido nas medições efetuadas pelo LIDAR.

4 Norma IEC 61400-12-1

Até há pouco tempo, as normas vigentes para a medição das características do vento apenas se focavam em medições realizadas com anemometria de copos. No entanto, as atraentes possibilidades oferecidas pelos dispositivos de medição remota, e a sua crescente divulgação no seio da indústria eólica, fizeram com que a sua regulamentação fosse necessária. Assim, a nova atualização da norma IEC 61400, publicada já no decorrer do desenvolvimento desta dissertação, que especifica um procedimento para a medição da performance de um único aerogerador, e aplica-se para o teste de aerogeradores de qualquer tipo e dimensão ligados à rede elétrica, possui ainda, pela primeira vez, um anexo inteiramente dedicado à operação de sistemas de medição remota.

Esta norma define também algumas condições relativamente ao local de medição. A medição da velocidade do vento deve ser feita na vizinhança do aerogerador para determinar a velocidade do vento que induzirá o acionamento deste. O local de medição poderá ter uma influência significativa nas medições realizadas, devido a distorções no escoamento atmosférico, devendo-se, portanto, avaliar as fontes de distorção do escoamento para ser possível [10]:

- Escolher a posição do equipamento de medição
- Definir um sector de medição adequado
- Determinar se é necessário “*site calibration*” e estimar apropriadamente os fatores de correção para o escoamento
- Avaliar a incerteza devida à distorção do escoamento

Variações topográficas, existência de outras turbinas eólicas e obstáculos (edifícios, vegetação,...) são fatores que devem ser tomados em conta para a realização destas medições [10].

4.1 Localização do Equipamento de Medição

No planeamento de uma campanha de medição, a localização dos equipamentos de caracterização do escoamento atmosférico deve ser bem ponderada, principalmente em casos em que a campanha tenha como objetivo a monitorização de um parque eólico. Nestes casos, os equipamentos de medição não se devem encontrar-se muito próximos de aerogeradores, uma vez que estes influenciam o escoamento atmosférico, influenciando assim a velocidade a ser medida. Por outro lado, também não devem ser colocados demasiado afastados destes. A instrumentação deve ser colocada a uma distância entre 2 a 4 diâmetros do rotor (D) do aerogerador. Uma distância de $2,5D$ é o recomendado. Caso se trate de uma turbina de eixo vertical, o D equivalente é dado por $2\sqrt{A/\pi}$, onde A é a área varrida pelo rotor, e a distância a que o equipamento de medição se deve encontrar é $L+0,5D$, sendo L a distância entre o centro da torre da turbina e a torre de uma turbina equivalente de eixo horizontal [10].

4.2 Sector de Medição

Na realização de uma campanha de medição, podem existir setores, ou azimutes, para os quais as medições se encontram comprometidas devido a diversos fatores. Assim, setores de medição nos quais existam obstáculos significativos e/ou outros aerogeradores, devem ser excluídos. Para todos os obstáculos próximos do local de medição, as direções que devem ser excluídas devido ao escoamento se encontrar perturbado por fatores orográficos devem ser determinadas utilizando os procedimentos especificados, que variam em função do caso em questão.

Os sectores influenciados a serem excluídos devido ao equipamento de medição se encontrar na esteira de uma turbina eólica estão identificados na figura 20. Assim, para equipamentos localizados a 2 diâmetros de rotor da turbina (D), 81° devem ser eliminados dos dados obtidos, a $2,5D$ 74° , e 59° quanto o equipamento se encontra a $4D$ da turbina [10].

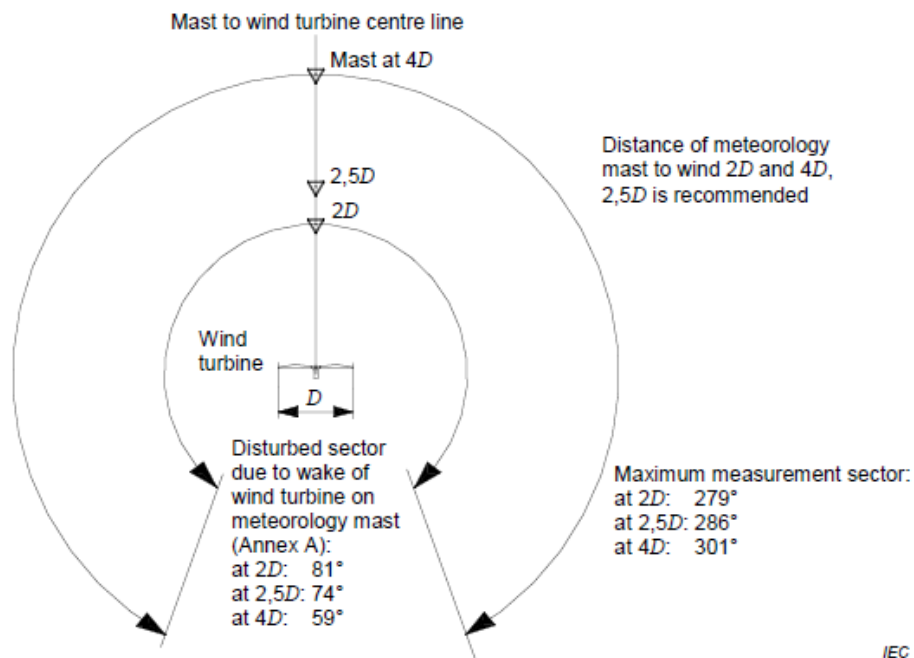


Figura 20 - Requisitos de distância do equipamento de medição de vento e sectores de medição máximos permitidos [10].

Os dados utilizados no âmbito desta dissertação não se encontravam influenciados por qualquer aerogerador, pelo que não foram descartados quaisquer registos por esse motivo.

No que diz respeito a azimutes influenciados pela torre nas medições efetuadas por anemómetros instalados na mesma, a norma IEC indica que os sectores a serem excluídos deverão ser aqueles que englobam o ângulo formado entre a haste onde se encontra instalado o instrumento de medição, e a outra extremidade da torre, mais 45° para ambos os sentidos, como é possível observar na figura 21. No entanto, como será explicado com mais detalhe no decorrer desta dissertação, optou-se por não seguir esta indicação, uma vez que levaria à eliminação de um número demasiado elevado de registos, pondo em causa a posterior comparação de resultados.

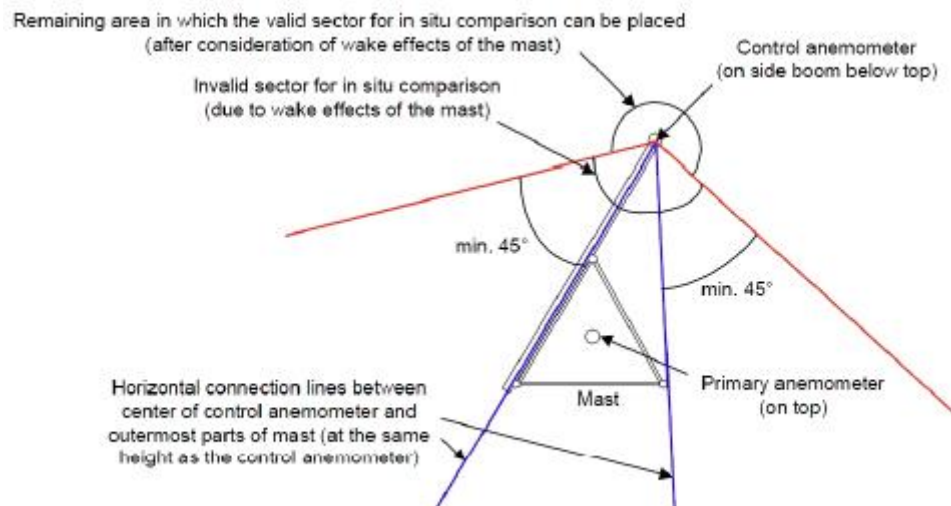


Figura 21 - Sectores a eliminar devido a influência da torre nas medições obtidas [10].

4.3 Diretivas para a utilização de tecnologia de detecção remota

Como foi referido anteriormente, a norma IEC 61400 possui, no Anexo L, uma descrição dos requisitos para a operação de sistemas de medição remota. Nesta versão são abordados os seguintes casos [10]:

- Uma torre de medição de altura mínima 40 metros, ou da altura da “*lower tip*” da turbina eólica que está a ser testada deve ser utilizada para monitorizar a performance do sistema de medição remota durante o teste de curva de potência
- Apenas instrumentos localizados no solo (instrumentos localizados na nacelle não estão incluídos)
- A utilização de dispositivos de medição remota está limitada a terreno plano, ou seja, situações nas quais “*site calibration*” não é necessária.

O “*site calibration*”, que já havia sido mencionado anteriormente, tem como objetivo quantificar e, potencialmente, reduzir os efeitos do terreno na medição da curva de potência de um aerogerador. O terreno em causa pode provocar uma diferença sistemática entre a velocidade do vento medida na torre de medição onde o anemómetro se encontra instalado e aquela que é medida, a uma altura equivalente, no centro do rotor da turbina eólica. Adicionalmente, a relação entre os valores de referência obtidos nas torres de medição e os valores obtidos na turbina eólica pode também ser afetada pela estabilidade atmosférica e/ou perfil de velocidades (“*shear profile*”). No final, o “*site calibration*” devolve uma tabela de fatores de correção em função da velocidade e direção do vento e ainda uma estimativa da incerteza padrão destas correções de escoamento [10].

Quando comparados com as medições obtidas através de um anemómetro de copos, os resultados de dispositivos de detecção remota apresentam normalmente um certo nível de dispersão. Esta dispersão deve-se em parte à sensibilidade do instrumento para diversas condições ambientais. O teste de classificação tem a função de identificar e quantificar estas sensibilidades diversas alturas, cobrindo o alcance de medição de interesse. Os restantes resultados dispersos são considerados provenientes de ruído aleatório¹³.

¹³ “*Random noise*”

Antes de ser utilizado num teste de curva de potência, um determinado instrumento de medição remota deve primeiro ser submetido a um teste de verificação. Este teste não é mais do que uma comparação dos resultados obtidos deste dispositivo com aqueles obtidos através de anemômetros de copos calibrados, montados numa torre de medição. Este teste tem como objetivo permitir a traçabilidade para standards internacionais deste instrumento, na forma de uma incerteza. Um segundo resultado do teste de verificação é a avaliação do ruído aleatório do equipamento.

As condições meteorológicas durante o teste de curva de potência podem-se afastar suficientemente das condições existentes durante o teste de verificação de performance, para a performance do dispositivo de detecção remota variar durante os testes. Caso a influência desta variação não seja adequadamente interpretada, a medição remota passa a não poder ser aplicável. É, pois, necessário avaliar a sensibilidade de atuação do sistema a variáveis meteorológicas. Os resultados destes testes devem identificar as variáveis que influenciam a performance do sistema e determinar a classificação do instrumento de medição. A mais simples destas avaliações implica considerar a diferença entre o dispositivo de medição remota e uma medição referência como função de uma variável meteorológica de cada vez. Esta avaliação deve ser cuidadosa para possibilitar a identificação de interdependências entre as variáveis ambientais de maneira a que as sensibilidades não sejam duplamente contabilizadas. As incertezas resultantes da detecção remota podem então ser avaliadas [10].

No anexo H da presente dissertação é possível consultar uma descrição mais detalhada do Anexo L da norma IEC 61400.

5 Casos de estudo

Como já foi mencionado diversas vezes, a tecnologia LIDAR apresenta resultados interessantes em terrenos simples e planos, onde o escoamento é homogéneo. O maior obstáculo passa então pela obtenção de uma performance semelhante em terreno complexo.

Com o intuito de estudar a fiabilidade desta tecnologia em terreno complexo, foram utilizados dados de duas campanhas de medição distintas com recurso a um mesmo LIDAR, no Vale de Estrela, entre julho e setembro de 2013, e na Aboadela, entre março e novembro de 2015.

Para efeitos de referência, pese embora não haja um verdadeiro consenso acerca de qual dos anemómetros apresenta resultados mais precisos, os valores obtidos pelos anemómetros de copos serão os escolhidos, em concordância com o estipulado no Anexo L da norma IEC 61400.

Os dados recolhidos no decorrer em ambas as campanhas de medição foram fornecidos em formato CSV¹⁴. Estes tiveram de ser exportados, nomeclados e analisados em função das diversas variáveis medidas. Todo o programa necessário para este tratamento, e posterior filtragem de dados, teve de ser criado do zero, tendo sido realizado com recurso a linguagem Python.

5.1 Campanha de Medição na Aboadela

A campanha de medição na Aboadela decorreu desde o dia 27 de março de 2015 até ao dia 23 de novembro de 2015 para o LIDAR, e entre o dia 1 de março de 2015 e o dia 30 de novembro de 2015 para os equipamentos instalados na torre de medição. Obviamente, apenas serão utilizados os dados de 27 de março de 2015 até 23 de novembro de 2015, pois é neste intervalo que se possuem dados concorrentes do LIDAR e da torre de medição, sendo impossível a comparação de valores noutro intervalo temporal.

O local no qual foi conduzida esta campanha de medição, ilustrado na figura 22, encontra-se a cerca de 820 metros de altitude, na montanha da Feiteira, localizada na serra do Marão, próximo da freguesia da Aboadela, no concelho de Amarante. Este local, devido à alta complexidade que apresenta, é propício à aparição de vento com componentes verticais de velocidade não nula.

¹⁴ “Comma Separated Values”

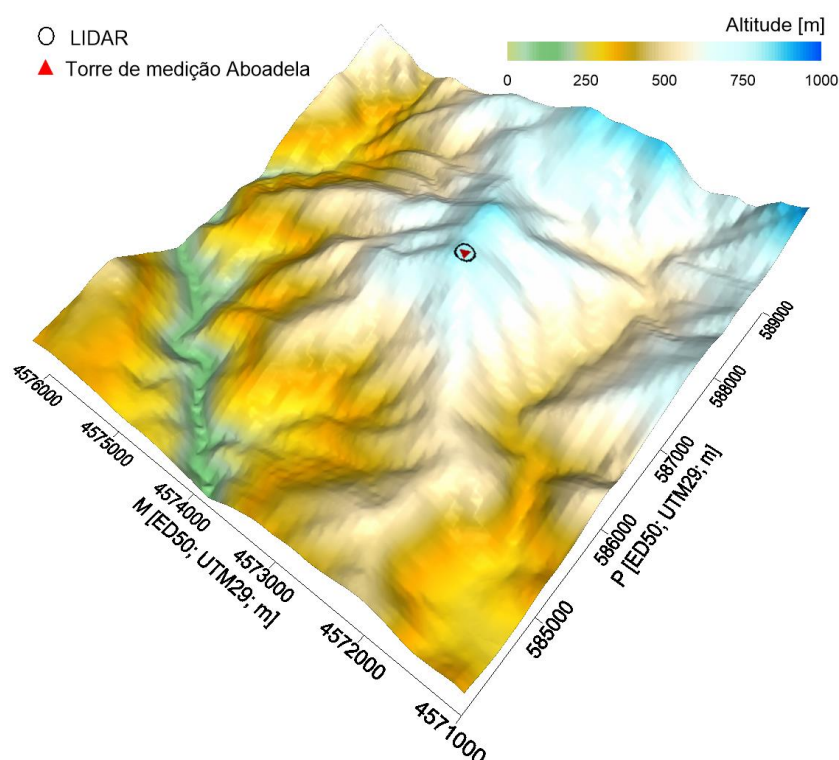


Figura 22 - Local onde foi efetuada a campanha de medição na Aboadela com localização da torre de medição e do LIDAR.

Para esta campanha de medição foi instalado no local uma torre de medição com 101 metros de altura, equipada com anemómetros de copos, anemómetros sónicos, sensores de direção, humidade, pressão, temperatura, radiação e precipitação, a diversas alturas.

O LIDAR de feixe contínuo ZephIR foi instalado a cerca de 10 metros de distância da torre de medição, tendo sido programado para efetuar medições a 18, 38, 58, 99, 138, 198 e 800 metros de altura. Adicionalmente, e para posterior comparação de valores obtidos entre os sensores de referência e o LIDAR, há que ter em conta que este último, só por si, tem cerca de 2 metros. Assim, uma medição a 18 metros é na realidade uma medição a 20 metros a.n.s., e assim sucessivamente.

A torre de medição e o LIDAR utilizados nesta campanha de medição encontram-se esquematizados no anexo A da presente dissertação.

Como os sistemas de medição distam um do outro cerca de 10 metros, há que ter em atenção a possível afetação da torre de medição e respetivos cabos de sustentação nos resultados obtidos pelo LIDAR e anemómetros. As posições relativas dos dois instrumentos de medição encontram-se ilustrados na figura 23. No entanto, visto que o LIDAR efetua medições num volume de prova de dimensão muito superior ao dos anemómetros, a interferência da torre de medição nos dados obtidos será menor do que aquela que se verifica na anemometria existente.

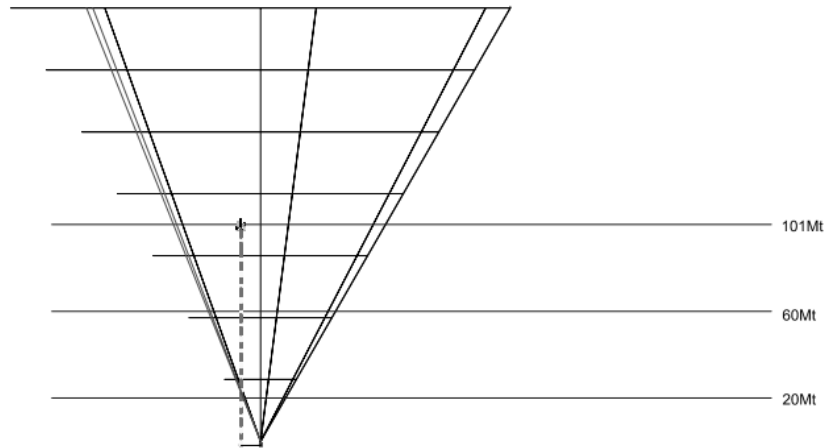


Figura 23 - Torre de medição e LIDAR na campanha da Aboadela.

5.1.1 Resultados Brutos

Numa primeira análise, simplesmente comparando os valores obtidos através do LIDAR e dos anemômetros de copos, foi identificada a existência de valores completamente erráticos. Estes valores são, na verdade, uma “mensagem de erro” do LIDAR, daí os valores absurdos de velocidade horizontal do vento a rondar os 10000 m/s. Assim sendo, foram eliminados da base de dados estes registos oriundos do LIDAR, para todas as alturas analisadas. Também os anemômetros de copos possuíam algumas mensagens de erro, sendo que estes valores foram igualmente excluídos. Os resultados brutos da campanha de medição estão indicados na tabela 3 e nas figuras 24, 25 e 26.

Tabela 3 - Resultados brutos da campanha de medição na Aboadela

Variável	Anemómetro de copos			LIDAR			Unidades
Altura de medição	101	60	20	101	60	20	[m a.n.s.]
Vel. Med.	5,48	5,33	4,94	5,31	5,20	4,89	[m/s]
Vel. Max.	31,38	30,65	28,83	29,34	28,65	26,34	[m/s]
Fluxo de potência	706,00	644,98	500,00	546,21	520,84	435,11	[W/m²]
IT	0,18	0,18	0,20	0,19	0,21	0,23	-
	Sensores instalados na torre de medição		Sensor do LIDAR				
Altura de medição	97	17					[m a.n.s.]
Temperatura média	14,86°C	13,46	15,39				[°C]
Humidade média	66,96	67,13	67,98				[%]
Pressão Média	-	913,86	923,28				[hPa]

em que o fluxo de potência é calculado através da equação 20

$$Pot = \rho \times v_{hor}^3 \quad (20)$$

onde, pela lei dos gases perfeitos,

$$\rho = \frac{p}{T \times R} \quad (21)$$

Em que ρ é a massa volúmica do escoamento, p é a pressão atmosférica, T é a temperatura atmosférica, e R é a constante universal dos gases perfeitos ($R_{ar}=287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Para a determinação do fluxo de potência a 20 m a.n.s. foi utilizada a densidade do ar calculada através dos dados obtidos pelos sensores existentes no LIDAR. Para os 101 m a.n.s. a densidade utilizada foi aquela calculada a partir dos valores obtidos nos sensores instalados na torre de medição, a 97 m a.n.s.. Já a 60 m a.n.s., a densidade utilizada foi a média das densidades previamente calculadas.

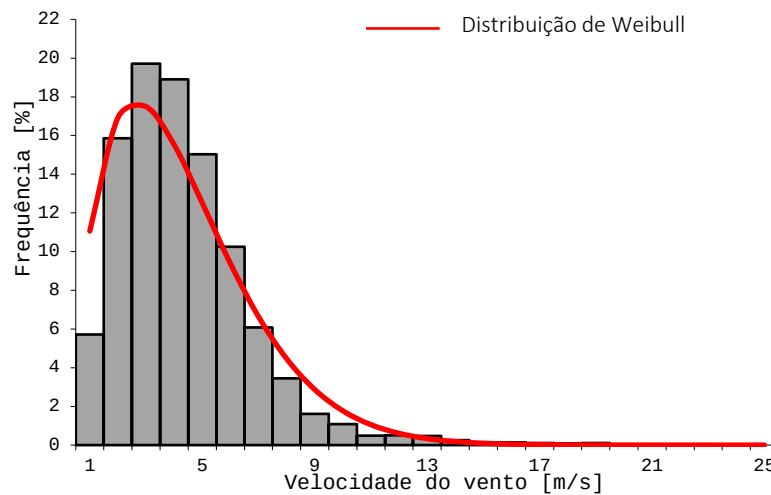


Figura 24 - Histograma de ocorrências para a campanha de medição da Aboadela

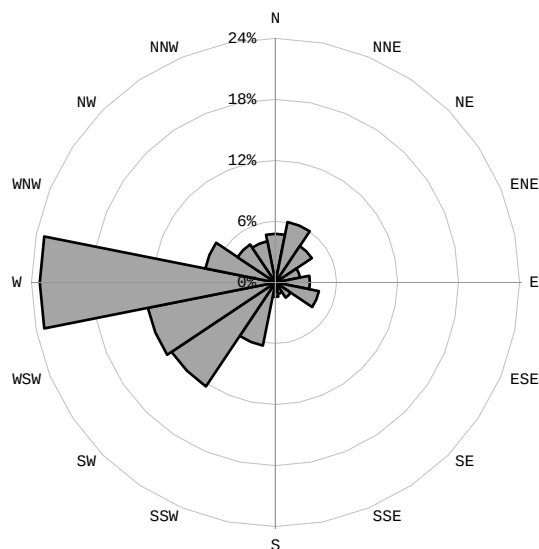


Figura 25 - Rosa dos ventos para a campanha de medição na Aboadela

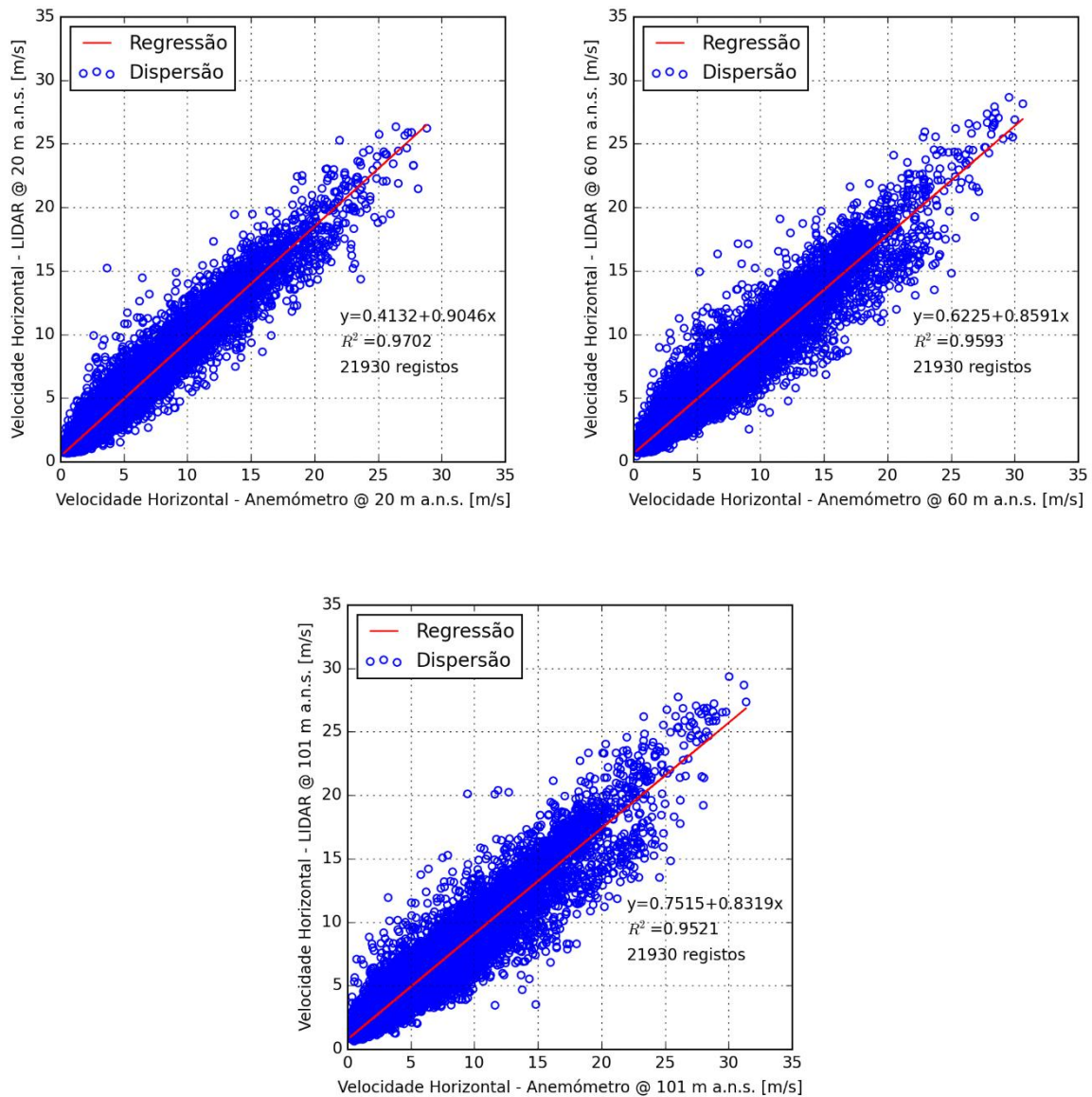


Figura 26 - Regressão linear (dados brutos) entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

Por fim, é importante referir que durante a campanha de medição, a disponibilidade apresentada pelo LIDAR foi de 65,1%. Após a filtragem dos dados relativos às mensagens de erro, esta disponibilidade baixou para os 63,2%.

5.1.2 Tratamento de Dados

O tratamento de dados foi efetuado tendo em conta os princípios base utilizados na indústria eólica. No decorrer desta secção serão enumerados os diferentes filtros. No anexo C encontram-se esquematizados estes mesmo filtros, enquanto no anexo D se encontram ilustrados os efeitos da aplicação destes filtros na base de dados.

Por indicação do fabricante do LIDAR, só foram considerados valores que apresentam “*Status Flag*” verde. Caso este valor fosse distinto, o dispositivo poderia estar com algum problema operacional, não sendo as medições fiáveis. Adicionalmente, devido à dificuldade que o LIDAR apresenta em efetuar medições em condições de precipitação, foram excluídas medições para as quais o sensor de chuva do LIDAR indicava valor 1. No entanto, a norma IEC 61400 indica que valores obtidos em condições de precipitação não devem ser eliminados, devendo a chuva

ser analisada como uma variável ambiental. Para este efeito, possuímos um sensor de precipitação na torre, instalado a 17 metros de altura. Este sensor não tem um funcionamento análogo àquele existente no LIDAR (que apenas fornece o valor 0, condições sem chuva, ou 1, condições de chuva), apresentando a quantidade de precipitação em mm. Assim, e uma vez que a ocorrência de precipitação não leva, automaticamente, a que o sensor do LIDAR indique o valor 1, a eliminação dos dados referidos não elimina completamente os valores obtidos em condições de precipitação. Infelizmente, no decorrer da campanha de medição, o sensor de precipitação instalado na torre de medição sofreu uns problemas, pelo que a sua utilização na comparação de resultados será descartada, assim como, consequentemente, a análise da precipitação como sendo uma variável ambiental.

Devido à pouca relevância no contexto da energia eólica, e à maior dificuldade que o LIDAR apresenta na medição de valores de velocidade baixos, velocidades inferiores a 3 m/s foram também elas descartadas. Esta dificuldade nas medições de pequenas velocidades também é acompanhada pelos anemómetros de copos, devido em parte à inércia que o mecanismo apresenta. Assim, velocidades abaixo dos 3 m/s obtidas através da anemometria de copos também serão descartadas. De referir ainda que as velocidades mencionadas foram descartadas para a altura de referência, os 101 m a.n.s., altura do eixo do rotor de um suposto aerogerador.

No que diz respeito a setores de medição influenciados pela torre de medição, estes dependerão do sensor que estejamos a analisar. A norma IEC indica uma metodologia para a filtragem de sectores de medição em anemómetros instalados em torres de medição. No entanto, como foi previamente referido, a utilização desta metodologia levaria a um encurtamento excessivo da amostra final, dificultando a posterior análise de resultados, optou-se, então, por um tratamento de dados distinto. Assim, em vez de se adicionarem os 45° referidos na norma, optou-se pela adição de 20°.

Uma nota ainda para o caso existente nas medições a 101 metros a.n.s., onde o anemómetro de copos já não se encontra afetado pela esteira da torre de medição, o que é facilmente perceptível na figura 63, no Anexo A. No entanto, como se observa na figura 27, existe uma pequena influência sobre os copos por volta dos 50°. Uma vez que não existem anemómetros sónicos a 101 metros de altura, para estudar esta influência os valores do anemómetro de copos foram comparados com os valores obtidos pelo anemómetro sónico instalado a 98 metros de altura. Esta influência já não é resultado da interferência da torre no escoamento atmosférico, mas sim da perturbação do para-raios no mesmo. Assim, devem ser eliminadas velocidades do vento com azimutes entre os 35° e os 55°, para o anemómetro de copos localizado a 101 metros de altura, eliminando-se assim um setor de 20°, como foi feito para as direções influenciadas pela torre de medição.

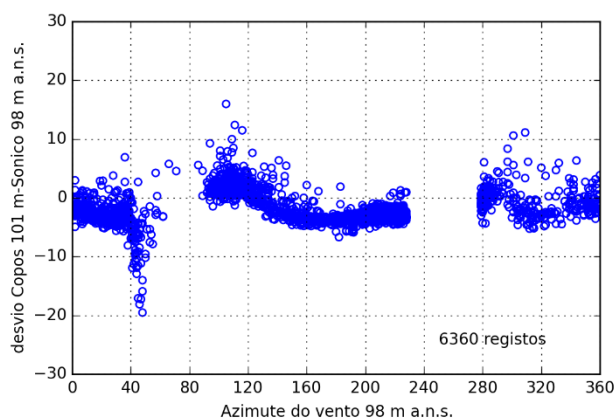


Figura 27 - Influência do para-raios no desvio das medições entre a anemometria de copos e o LIDAR, a 101 m a.n.s..

Na tabela 4 encontram-se detalhadas os azimutes eliminados da base de dados por altura do sensor de direção.

Tabela 4 - Sectores influenciados pela torre de medição

Altura do sensor de direção [m]	Altura da anemometria de copos afetada [m a.n.s.]	Azimutes dos anemómetros de copos influenciados	Altura da anemometria sónica afetada [m a.n.s.]	Azimutes dos anemómetros sónicos influenciados
18	20	47° - 97°	20	228° - 278°
58	60	47° - 97°	60	228° - 278°
98	101	40° - 55°	98	229° - 279°

Poderia ter-se optado por tratar os dados por nível, ou seja, por exemplo, quando se estivessem a analisar as medições a 60 metros a.n.s., apenas considerar o filtro de direções para esta altura, desativando os demais. Desta forma, obter-se-ia o maior número possível de registos por altura de interesse. No entanto, isto complicaria a posterior comparação de resultados, visto esta estar, nesse caso, a ser efetuada para dados distintos. Assim, optou-se por efetuar uma filtragem de direções geral a toda a base de dados, eliminando-se todos os setores influenciados acima referidos.

Valores de humidade elevados estão também associados a resultados mais dispersos, visto poder ser um indicador da presença de nevoeiro cerrado. Assim, valores de humidade superiores a 97% obtidos através do sensor de humidade localizado a 97 metros de altura do solo foram também excluídos.

Foram ainda excluídos registos obtidos pelo LIDAR em que o “*Spatial Variation*” fosse superior a 0,15, para todas as alturas em análise.

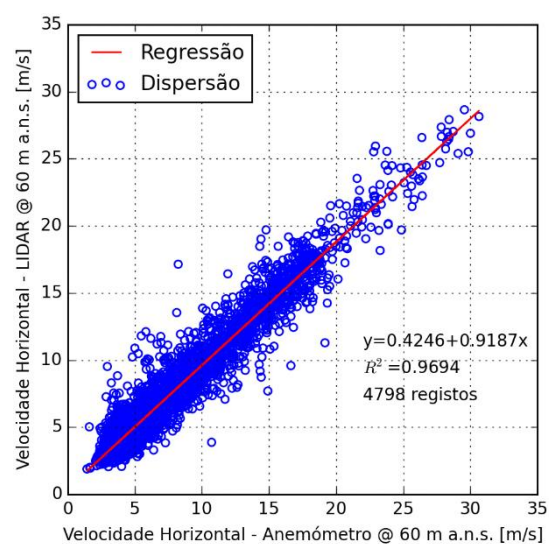
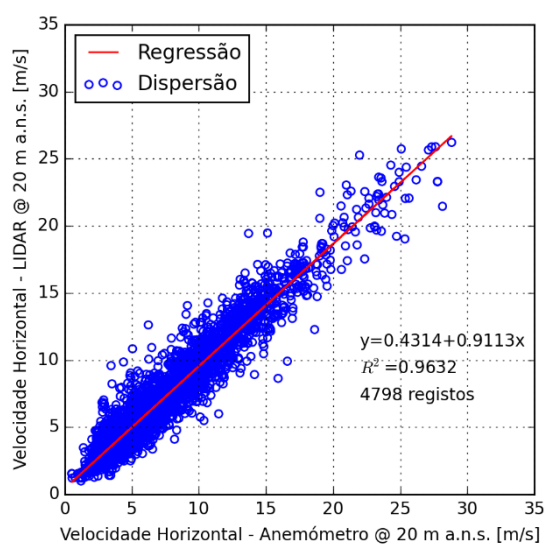
De referir ainda, que para análise de temperaturas, iremos utilizar os valores do sensor de temperatura existente no LIDAR, visto o sensor de temperatura instalado a 17 metros ter tido alguns problemas no decorrer da campanha de medição e possuir bastantes dados em falta. Uma vez que esta campanha de medição foi realizada entre março e novembro, e tendo sido a temperatura mínima registada nesse intervalo temporal de cerca de 5°C e 2°C, a 2 (sensor de temperatura do LIDAR) e 97 metros de altura respetivamente, o gelo não deverá ter sido um fator influenciador nas medições dos anemómetros de copos, pelo que não foi um fator tido em conta no tratamento de dados.

Os resultados obtidos após esta primeira fase de filtragem encontram-se indicados na tabela 5 e figura 28.

No final desta filtragem, a disponibilidade do LIDAR caiu para para os 13,8 % globais. No entanto, se analisarmos a disponibilidade do equipamento somente relativa aos dados úteis (assumindo disponibilidade de 100% após a eliminação das mensagens de erro), a disponibilidade revelada pelo LIDAR foi de 21,9%.

Tabela 5 - Resultados obtidos para a campanha de medição na Aboadela após a execução da filtragem base

Variável	Anemómetro de copos			LIDAR			Unidades
Altura de medição	101	60	20	101	60	20	[m a.n.s.]
Vel. Med.	7,71	7,51	6,78	7,50	7,33	6,61	[m/s]
Vel. Max.	31,21	30,65	28,83	29,35	28,65	26,22	[m/s]
Fluxo de potência	1232,75	1145,99	832,65	1088,00	1020,68	737,14	[W/m²]
IT	0,16	0,17	0,19	0,18	0,20	0,23	-
	Sensores instalados na torre de medição			Sensor do LIDAR			
Altura de medição	97	17					[m a.n.s.]
Temperatura média	15,13	14,23		15,36			[°C]
Humidade média	55,78	56,58		60,47			[%]
Pressão Média	-	912,64		922,22			[hPa]



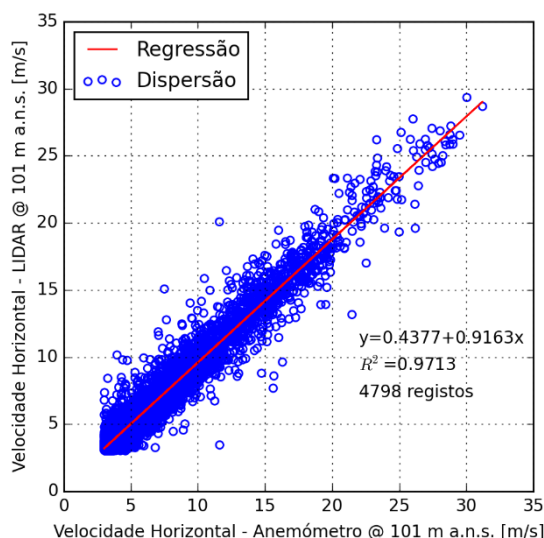


Figura 28 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, após efetuada a filtragem base, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

5.1.3 Testes de Sensibilidade

Os testes de sensibilidade foram realizados comparando o desvio entre as medições realizadas pelos anemômetros de referência e o LIDAR, em função de diferentes variáveis ambientais. Como a norma IEC 61400 indica, a regressão resultante foi realizada em função das médias obtidas para cada bin¹⁵, tendo sido ainda esquematizado o desvio padrão das medições em cada bin. Para a realização destes testes, embora a norma estipule intervalos a utilizar nas análises de sensibilidade, a norma não tem em consideração a utilização de LIDARs em terreno complexo. Assim, e visto que a análise das variáveis seguindo todas as estipulações da norma seria impraticável neste caso de estudo, foram escolhidos novos intervalos por bin, tentando, mesmo assim, fugir o menos possível ao que é indicado na norma IEC. As variáveis analisadas, valores extremos e intervalos escolhidos para os testes de sensibilidade estão indicados na tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis ambientais estudadas, e respetivos valores máximos, mínimos e intervalos de bin utilizados nos testes de sensibilidade na campanha de medição na Aboadela

Variável Ambiental	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo do bin	Unidade
Azímute do vento	0	360	10	[°]
Gradiente Térmico	-0,06	0,08	0,005	[°C/m]
Shear factor	-0,3	0,5	0,05	-
Intensidade de turbulência	0	0,4	0,02	-
Inclinação do escoamento	-10	10	1	[°]
RIX	15	40	5	[%]
Declive médio	23	30	1	[%]

¹⁵ Intervalo de velocidades

De referir que o RIX foi calculado para setores de 10°, estando assim em concordância com a divisão de setores efetuada para o azimute do escoamento atmosférico.

Para efeitos de consulta, os testes de sensibilidade realizados para a campanha de medição na Aboadela foram remetidos para o anexo F da presente dissertação.

5.1.4 Análise de Resultados

Após a primeira fase de filtragem de dados é necessário fazer, desde logo, algumas considerações. Numa primeira instância observou-se que os dados provenientes dos meses junho, julho e agosto foram os mais afetados por esta filtragem, no que a número de dados diz respeito. Isto poderia ser explicado pelo filtro de mensagens de erro ter afetado de maneira mais significativa os dados destes meses. No entanto, quando analisadas as percentagens afetadas pela posterior filtragem de dados, denota-se uma tendência de maior afetação para dados relativos ao período de verão, como é mostrado na tabela 7.

Tabela 7 - Disponibilidade mensal de dados após a aplicação do filtro base

Mês	Nº de dados após filtro mensagem de erro	Nº de dados após filtragem primária	Disponibilidade
Março	582	145	24,9%
Abril	1923	599	31,1%
Maio	3630	894	24,6%
Junho	1735	382	22,0%
Julho	1344	117	8,7%
Agosto	2481	353	14,2%
Setembro	3765	641	17,0%
Outubro	3438	1336	38,9%
Novembro	3032	331	10,9%

Isto pode ser explicado pelo facto da ocorrência de velocidade menores do que 3 m/s ser mais significativa nesta época do ano. Adicionalmente, também a maior frequência de ventos com azimutes compreendidos nos setores excluídos, ajuda a explicar esta falta de dados.

A análise do desvio entre as medições em função do azimute do vento revela uma dispersão mais elevada de dados entre os 100° e os 180°. Nas figuras 29 e 30, encontra-se ilustrada esta dispersão, para os 20 e os 101 m a.n.s.. Adicionalmente, é possível observar a diminuição da dispersão com a altura de medição. Esta é uma tendência esperada, visto que a alturas acima do nível do solo cada vez mais superiores, a orografia terrestre tem cada vez menos influência sobre o escoamento.

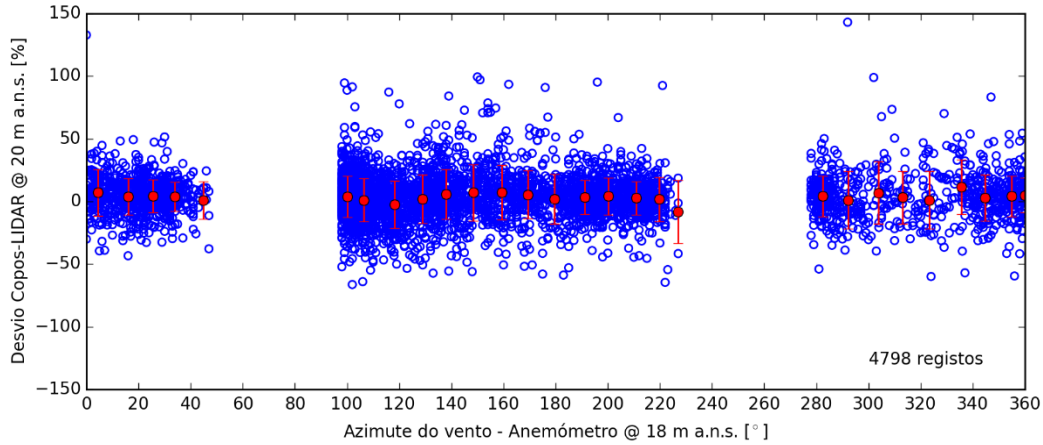


Figura 29 - Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do azimute do vento, a 20 m a.n.s..

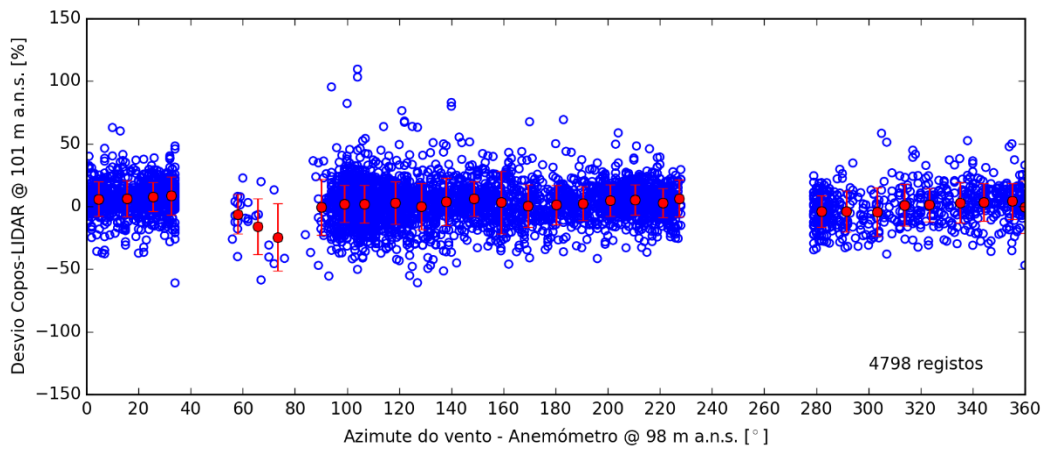


Figura 30 - Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do azimute do vento, a 101 m a.n.s..

Isto acontece devido à alta complexidade do local em estudo, principalmente neste setor, o qual é propício ao aparecimento de componentes de velocidade vertical não nulas, como é possível observar na figura 31, para os 60 m a.n.s..

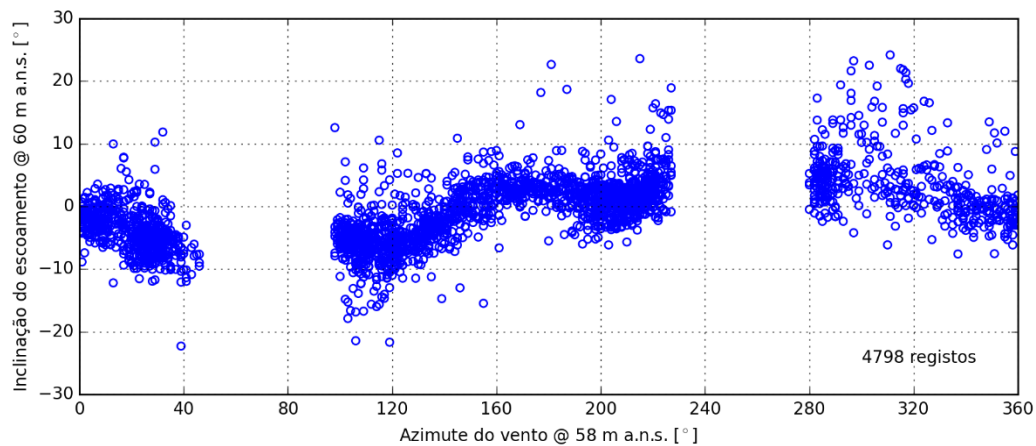


Figura 31 - Inclinação do escoamento a 60 m a.n.s. em função do azimute do vento, a 58 m a.n.s..

Nos testes de sensibilidade realizados relativos ao *shear factor*, observa-se uma tendência para o LIDAR sobrestimar o valor da velocidade com o aumento do *shear*, para altura de 20 m a.n.s. Para medições realizadas a 60 m a.n.s. esta tendência mantém-se, mas de forma bem menos pronunciada. Já no que toca a medições realizadas a 101 m a.n.s., identifica-se uma tendência contrária, com a subestimação do valor da velocidade do vento pelo LIDAR, com o aumento do *shear factor*. Esta tendência está identificada nas figuras 32 e 33, para os 20 e 101 m a.n.s., respetivamente.

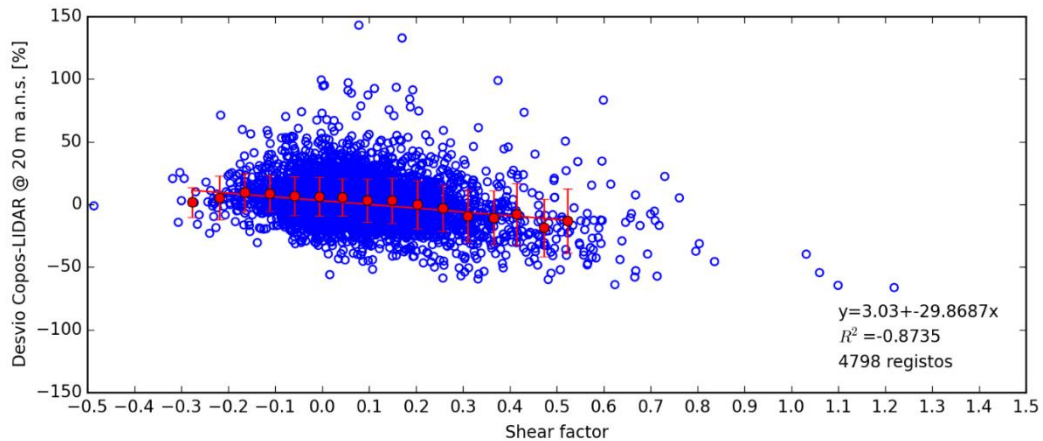


Figura 32 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, a 20 m a.n.s., em função do *shear factor*.

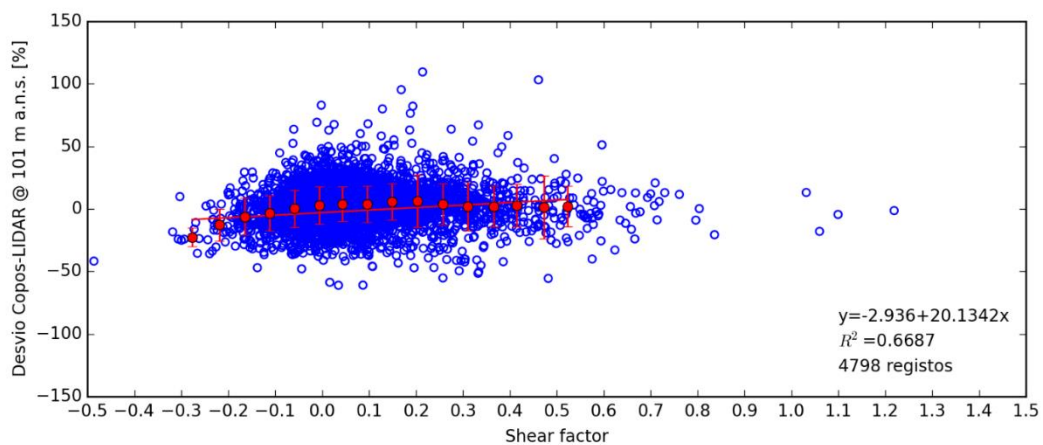


Figura 33 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, a 101 m a.n.s., em função do *shear factor*.

Para testes de sensibilidade referentes à intensidade de turbulência, revela-se uma tendência constante para todas as alturas em análise, com a sobrestimação do valor da velocidade por parte do LIDAR, com o aumento da turbulência. Na figura 34 encontra-se representada esta tendência, para medições realizadas a 101 m a.n.s..

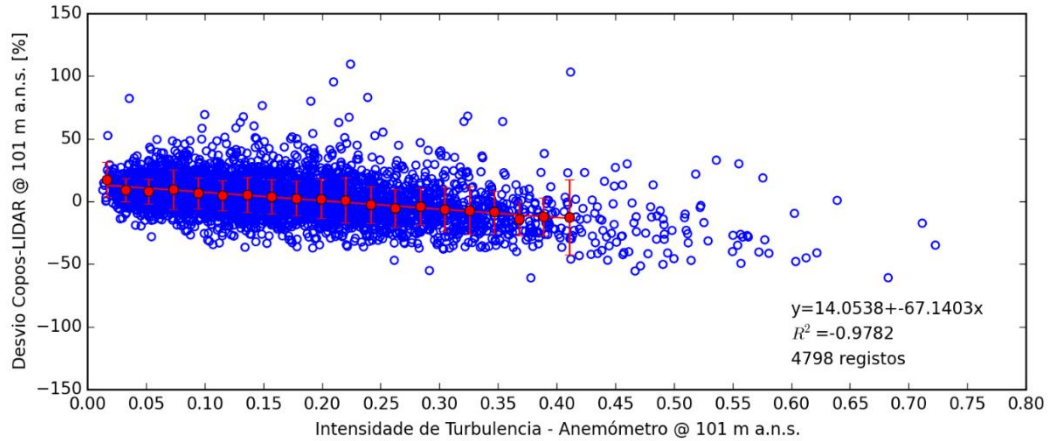


Figura 34 - Desvio das medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, a 101 m a.s.l., em função da intensidade de turbulência.

A análise do desvio em função do RIX permite visualizar uma tendência de maior disparidade de resultados com o aumento deste parâmetro. No entanto, esta tendência não é muito acentuada, visto que, para todas as direções, o RIX é sempre elevado, possuindo um valor médio de 30,2. Assim, a falta de sectores com RIX baixos não possibilita exponenciar esta tendência. No entanto ainda é possível observar que este fator vai perdendo influência nas medições, consoante estas sejam feitas para alturas cada vez maiores. Isto era esperado, visto que a maiores alturas do nível do solo a orografia local exerce menor influencia sobre o escoamento atmosférico. Este fenómeno está ilustrado nas figuras 35 e 36.

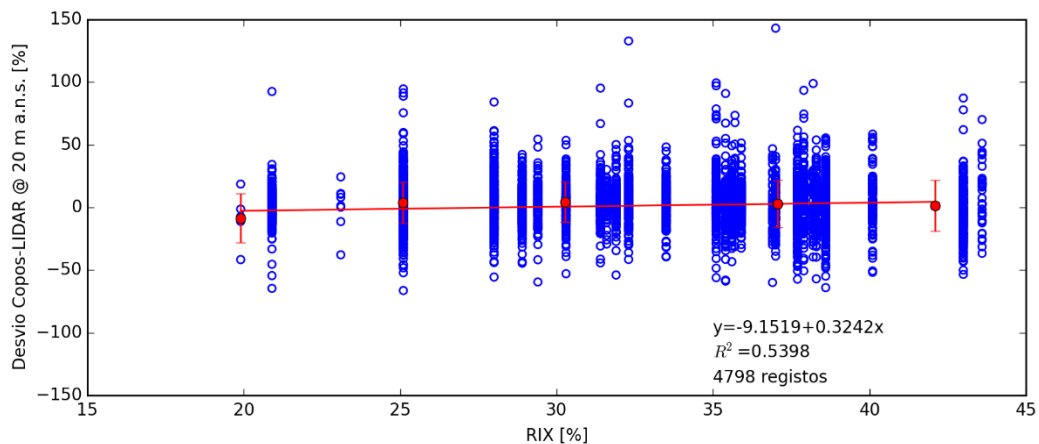


Figura 35 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 20 m a.s.l., em função do RIX.

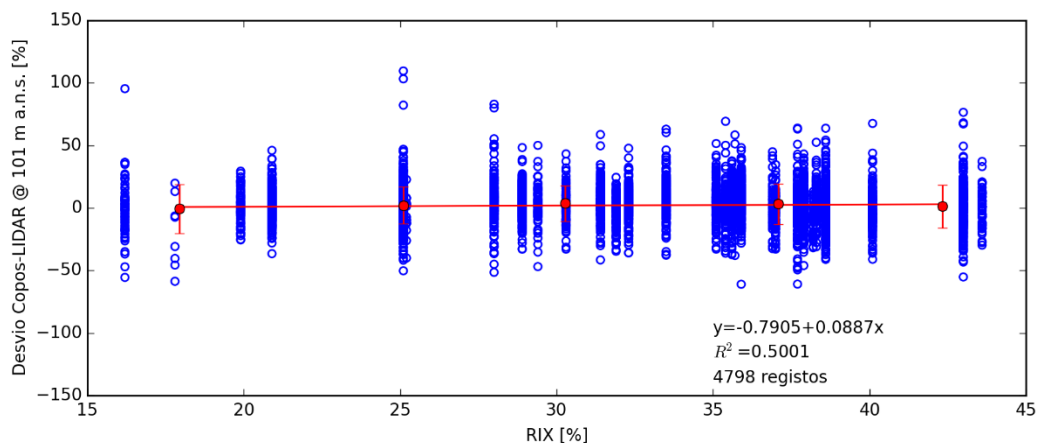
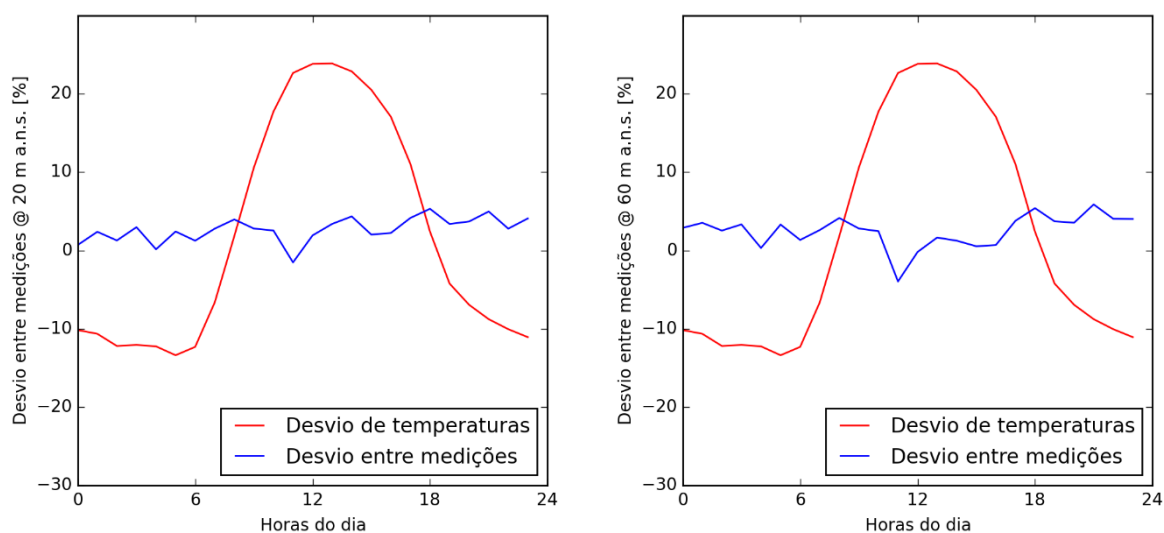


Figura 36 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 101 m a.n.s., em função do RIX.

A análise em função do declive médio por setor de medição (de 10°) também apresentou uma tendência semelhante ao RIX. Também para esta situação a falta de setores com declives médios baixos não permitiu uma tendência mais acentuada de aumento do desvio com o aumento do declive médio. Denota-se, no entanto, que esta tendência é amplificada com aumento da altura de medição.

Para os desvios em função do gradiente de temperaturas, embora se denote uma dispersão de valores superior para gradientes de temperatura negativos, este desvio pode ser explicada pelo facto de, após aplicação da filtragem primária, os azimutes com maior frequência de ocorrências estarem compreendidos entre os 100° e os 130°. Analisando o gradiente térmico em função do azimuth do vento, observa-se que a maior parte dos ventos com gradientes térmicos negativos são provenientes de azimutes compreendidos entre os 100 e os 130°. Assim, a maior frequência de ventos com gradientes negativos leva a esta maior dispersão.

Quando analisado este gradiente em função das horas do dia, é revelado um comportamento esperado de aumento do gradiente nas horas de maior radiação solar, atingindo-se um pico por volta das 12 horas. No entanto, quando comparado com o desvio médio das medições entre o anemómetro de referência e o LIDAR em função das horas, revela-se uma tendência de sobrestimação na medição por parte do LIDAR, quando o gradiente passa a ser positivo, o que se encontra ilustrado na figura 37.



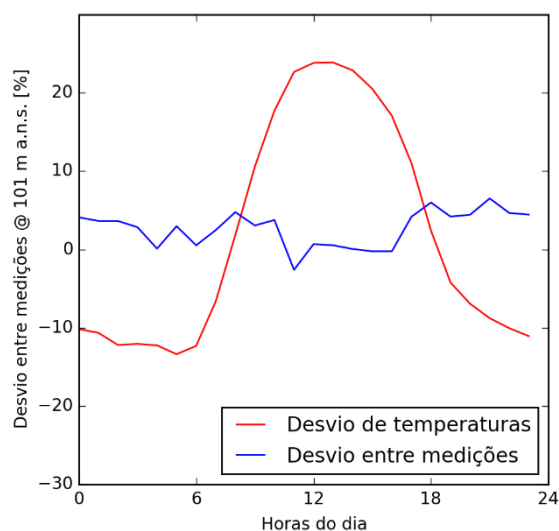
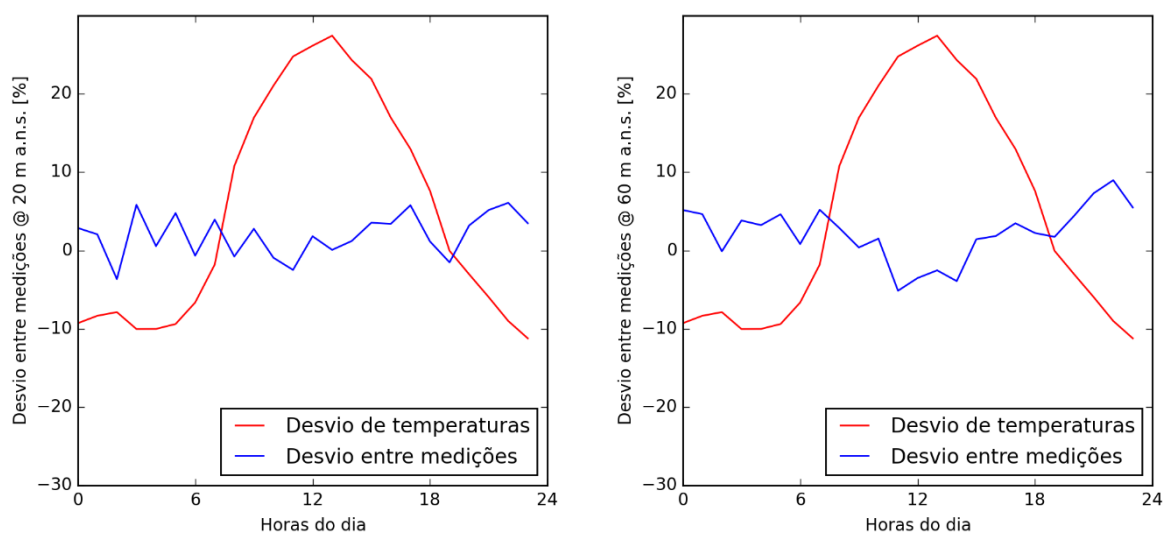


Figura 37 - Desvio percentual das medições entre o anemômetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor a 97 m a.n.s., em função da hora do dia.

Visto o desvio acontecer para horas de maior intensidade solar, foi analisado o período de intensidade solar mais significativo. Assim, utilizando apenas os dados relativos aos meses de verão (junho, julho e agosto), nos quais a intensidade da radiação solar é superior, verifica-se também um aumento claro desta tendência, ilustrada na figura 38. De referir também o aumento desta tendência com o aumento da distância de medição.



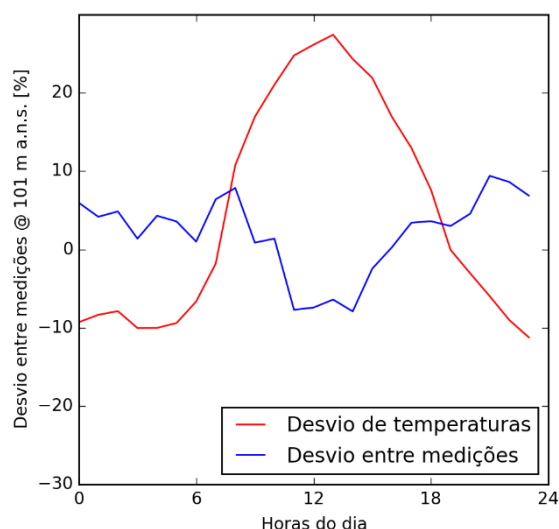


Figura 38 - Desvio percentual das medições entre o anemómetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor a 97 m a.n.s., em função da hora do dia para o período de verão

5.1.5 Conclusões

Da campanha de medição realizada na Aboadela verifica-se que o desvio entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e o LIDAR varia de modo semelhante com aumento da turbulência de intensidade, para qualquer distância de medição. Isto já não se verifica para o caso do *shear factor*, onde se observam tendências contrárias para as duas alturas de medição mais afastadas, 20 e 101 m a.n.s.

A análise ao RIX demonstrou uma certa tendência de aumento do desvio com o aumento deste parâmetro. No entanto, e como foi referido, a falta de RIX baixos impossibilitou a existência de uma tendência mais acentuada.

O caso mais interessante relaciona-se com o gradiente térmico, que quando atinge um valor máximo, durante as horas de maior intensidade solar, faz com que o LIDAR sobrestime o valor da velocidade horizontal. Esta tendência também se vai acentuar com o aumento da distância de medição.

5.2 Campanha de Medição no Vale de Estrela

Esta campanha de medição foi realizada entre o dia 31 de julho de 2013 e o dia 8 de setembro de 2013, numa campanha de medição no Vale da Estrela, concelho da Guarda. Aqui, embora o terreno seja complexo, o nível de complexidade é muito inferior àquele onde decorreu a campanha de medição da Aboadela. O terreno onde decorreu esta campanha de medição encontra-se ilustrado na figura 39.

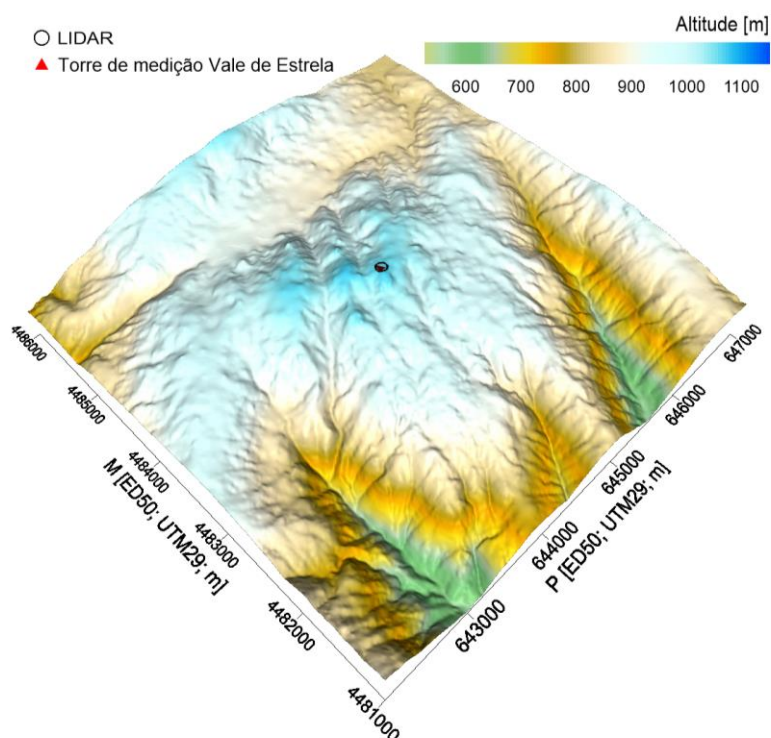


Figura 39 - Mapa topográfico 3D do local onde foi efetuada a campanha de medição no Vale de Estrela com localização da torre de medição e do LIDAR.

Para esta campanha, o LIDAR efetuou medições a 18, 39, 48, 79 e 110 metros de altura. A torre de medição que acompanhou o LIDAR estava equipada com anemómetros de copos e sensores de direção a 20, 40 e 81 metros de altura. A torre de medição e o LIDAR utilizados nesta campanha de medição encontram-se esquematizados no anexo B.

Nesta campanha, o LIDAR e a torre de medição encontravam-se distanciados de 18 metros, pelo que as considerações a tomar são relativamente idênticas às aquelas que foram analisadas para a campanha de medição da Aboadela. As posições relativas dos dois instrumentos de medição encontram-se ilustrados na figura 40.

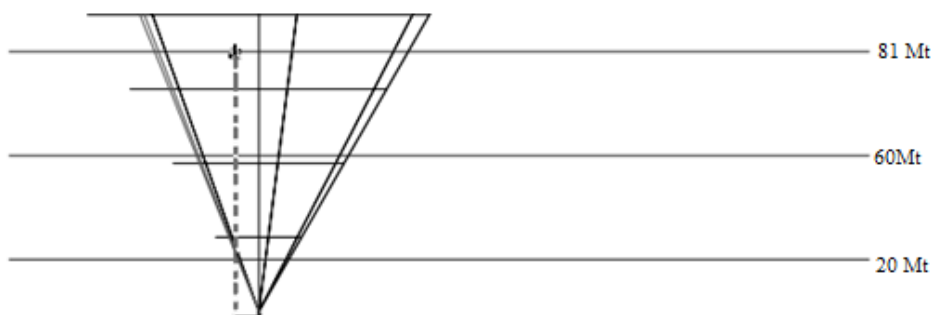


Figura 40 - Torre de medição e LIDAR na campanha de Vale de Estrela.

5.2.1 Resultados Brutos

Os resultados obtidos pelo LIDAR nesta campanha foram muito satisfatórios, observando-se uma dispersão pouco acentuada dos resultados. Esta tão pequena disparidade, quando comparada com aquela obtida na Aboadela, deve-se ao facto desta campanha de medição ter sido realizada, e como já foi referido, num terreno muito menos complexo. De referir ainda que

os dados fornecidos já se encontravam desprovidos de mensagens de erro. Os resultados brutos encontram-se indicados na tabela 8 e na figuras 41, 42 e 43.

Tabela 8 - Resultados brutos da campanha de medição no Vale de Estrela

Variável	Anemômetro de copos			LIDAR			Unidades
Altura de medição	81	40	20	81	40	20	[m a.n.s.]
Vel. Med.	6,92	6,33	5,75	6,81	6,37	5,83	[m/s]
Vel. Max.	16,60	15,30	14,20	15,97	15,23	14,21	[m/s]
Fluxo de potência	519,14	377,84	280,67	478,22	377,67	288,22	[W/m ²]
IT	0,12	0,14	0,16	0,15	0,17	0,19	-
	Sensores instalados na torre de medição			Sensor do LIDAR			
Altura de medição	75						[m a.n.s.]
Temperatura média	21,01			21,12			[°C]
Humidade média	49,14			45,95			[%]
Pressão Média	892,37			898,50			[hPa]

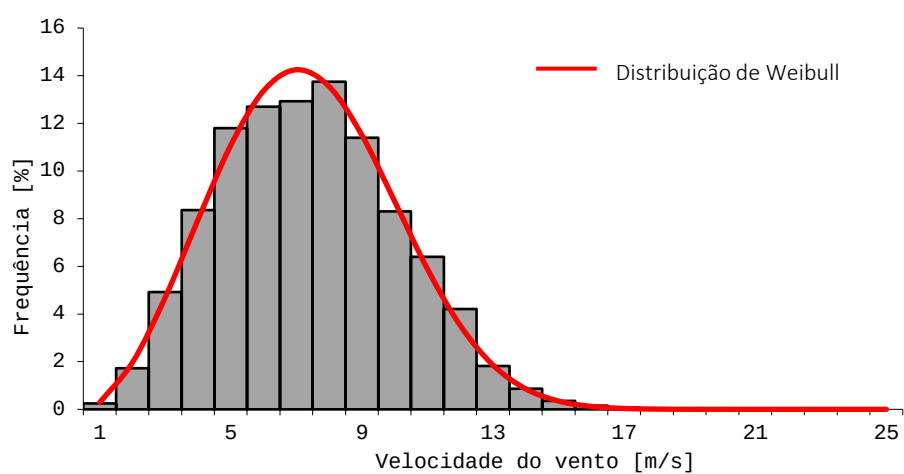


Figura 41 - Histograma de ocorrências para a campanha de medição em Vale de Estrela

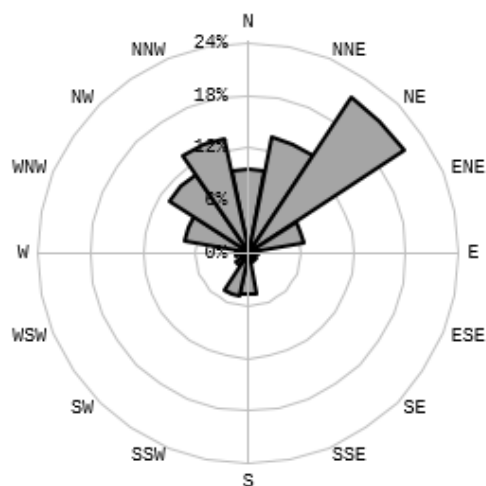


Figura 42 - Rosa dos ventos para a campanha de medição em Vale de Estrela

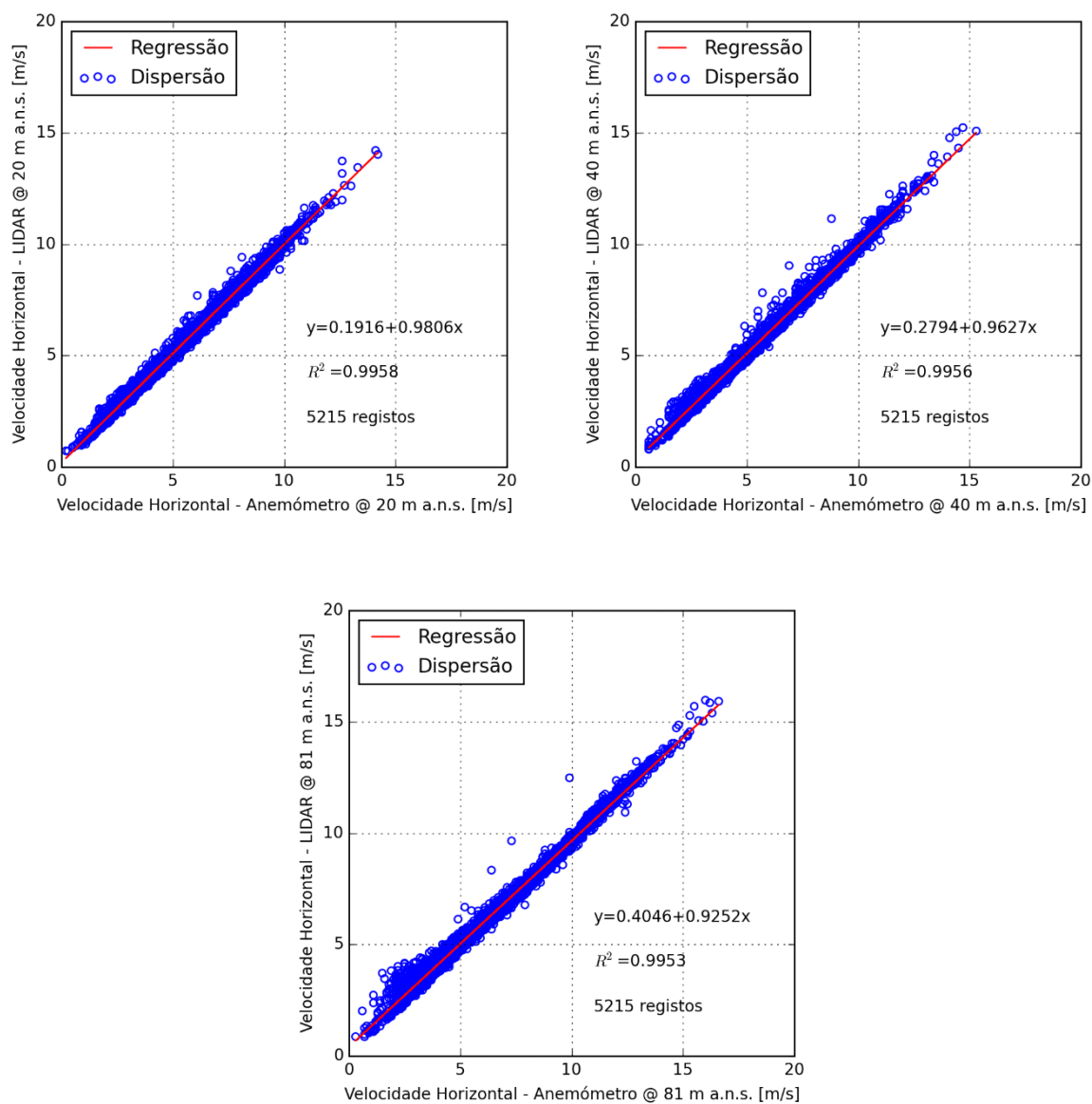


Figura 43 - Regressão linear (dados brutos) entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, para 20, 40 e 81 m a.n.s.

A disponibilidade demonstrada pelo LIDAR nesta campanha de medição foi de 90,5%. Como foi referido, esta disponibilidade já exclui qualquer mensagem de erro existente nos dados obtidos.

5.2.2 Tratamento de Dados

Da base de dados resultante desta campanha de medição, analogamente ao que foi realizado nos dados da campanha na Aboadela, foram excluídas velocidades inferiores a 3 m/s obtidas pelo LIDAR e pelos anemómetros de copos para a altura de referência. Neste caso, a altura de referência considerada foi 81 m a.n.s., visto ser esta a maior altura mensurada na campanha de medição. Também só foram considerados dados em que o valor “*Status Flag*” do LIDAR fosse verde.

Tendo sido esta campanha realizada entre junho e agosto, obviamente que o gelo não foi um factor a ter em conta. Este intervalo temporal também levou a que a humidade não fosse um factor importante na dispersão de resultados obtidos. No entanto, e em concordância com o que foi feito para a campanha da Aboadela, também foram excluídos dados em que a humidade fosse superior a 97%.

Uma vez que a torre de medição utilizada nesta campanha de medição não se encontrava equipada com anemómetros sónicos, a determinação de setores influenciados pela torre de medição não foi possível, tendo sido admitidos todos os valores.

Os resultados obtidos após esta primeira fase de filtragem encontram-se indicados na tabela 9 e figura 44.

Após efetuada a filtragem base, a disponibilidade demonstrada pelo LIDAR baixou para os 83,5%. Caso apenas se tenham em conta os dados úteis, a disponibilidade para esta campanha de medição foi de 92,2%

Tabela 9 - Resultados obtidos para a campanha de medição no Vale de Estrela após a execução da filtragem base

Variável	Anemómetro de copos			LIDAR			Unidades
Altura de medição	81	40	20	81	40	20	[m a.n.s.]
Vel. Med.	7,25	6,61	6,00	7,10	6,64	6,07	[m/s]
Vel. Max.	16,60	15,30	14,20	15,97	15,23	14,21	[m/s]
Fluxo de potência	555,75	403,95	299,70	511,33	403,31	307,46	[W/m ²]
IT	0,11	0,13	0,15	0,14	0,16	0,18	-
	Sensores instalados na torre de medição			Sensor do LIDAR			
Altura de medição	75						[m a.n.s.]
Temperatura média	20,89			20,93			[°C]
Humidade média	49,40			46,16			[%]
Pressão Média	892,32			898,47			[hPa]

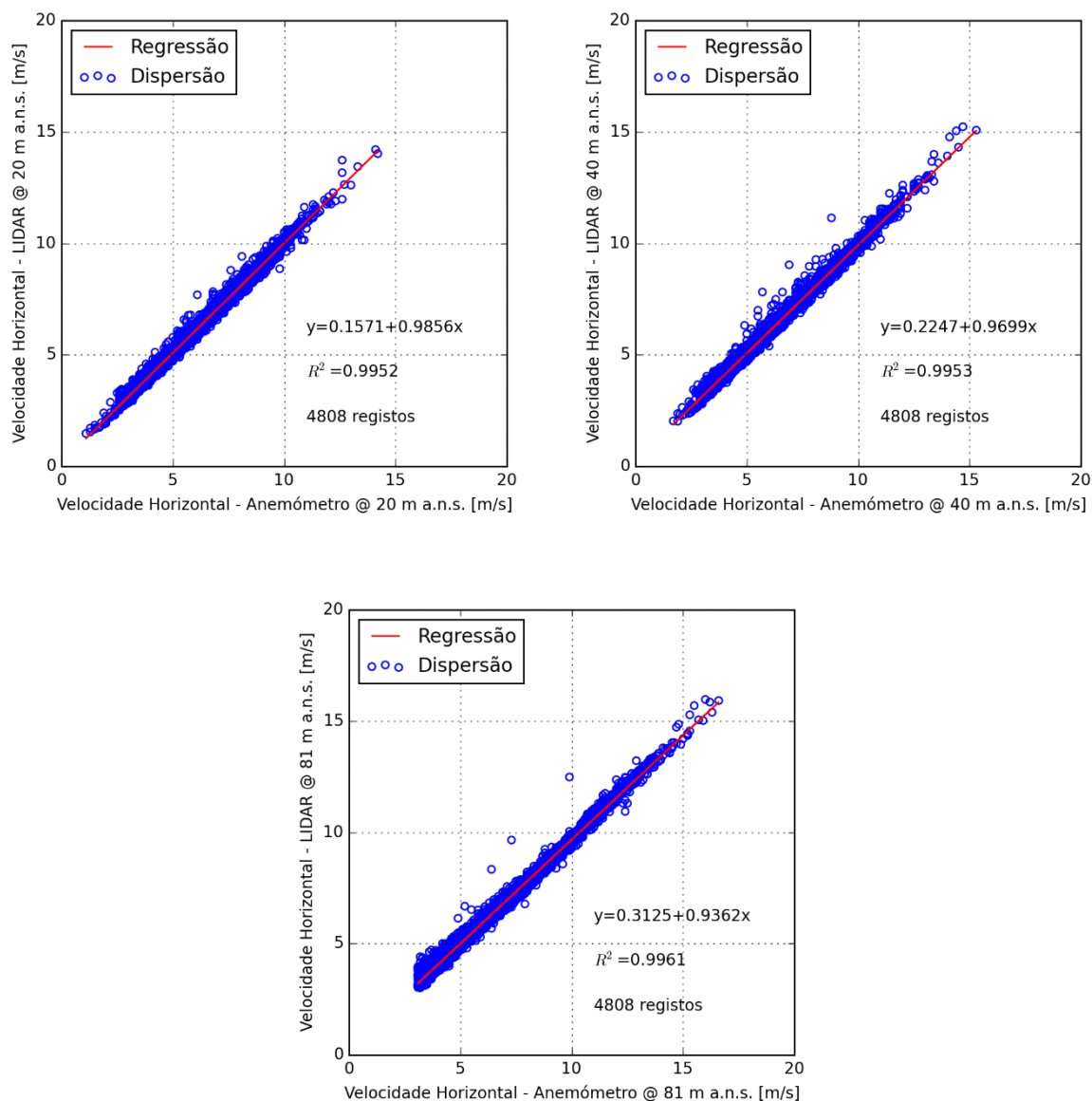


Figura 44 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR, após efetuada a filtragem base, para 20, 40 e 81 m a.s.l.

5.2.3 Testes de sensibilidade

Os testes de sensibilidade para esta campanha de medição seguiram o mesmo princípio daqueles realizados para a campanha na Aboadela. Assim, as variáveis analisadas e os intervalos escolhidos para os testes de sensibilidade estão indicados na tabela 10.

Tabela 10 - Variáveis ambientais estudadas, e respectivos valores máximos, mínimos e intervalos de bin utilizados nos testes de sensibilidade na campanha de medição no Vale de Estrela

Variável Ambiental	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo do bin	Unidade
Azimute do vento	0	360	10	[°]
Gradiente Térmico	-0,1	0,1	0,01	[°C/m]
Shear factor	-0,1	0,2	0,025	-
Intensidade de turbulência	0	0,4	0,02	-
Inclinação do escoamento	-4	4	0,5	[°]
RIX	0	30	5	[%]
Declive médio	22	30	1	[%]

Para efeitos de consulta, os testes de sensibilidade para a campanha de medição no Vale de Estrela encontram-se foram remetidos para o anexo G da presente dissertação.

5.2.4 Análise de Resultados

Tendo sido esta campanha de medição realizada quase exclusivamente no mês de agosto, e sendo este um dos meses mais desprovido de resultados na campanha de medição na Aboadela, a comparação de resultados obtidos nos dois casos tem de ser ponderada.

Uma primeira análise ao desvio entre as medições dos anemómetros de referência e do LIDAR em função do azimute do escoamento atmosférico, não nos mostra nenhuma tendência de desvio muito significativa para qualquer direção. Nota-se, ainda assim, uma tendência de maior desvio para azimutes compreendidos entre os 180° e os 220°, como se pode observar na figura 45, para medições efetuadas a 81 m a.n.s..

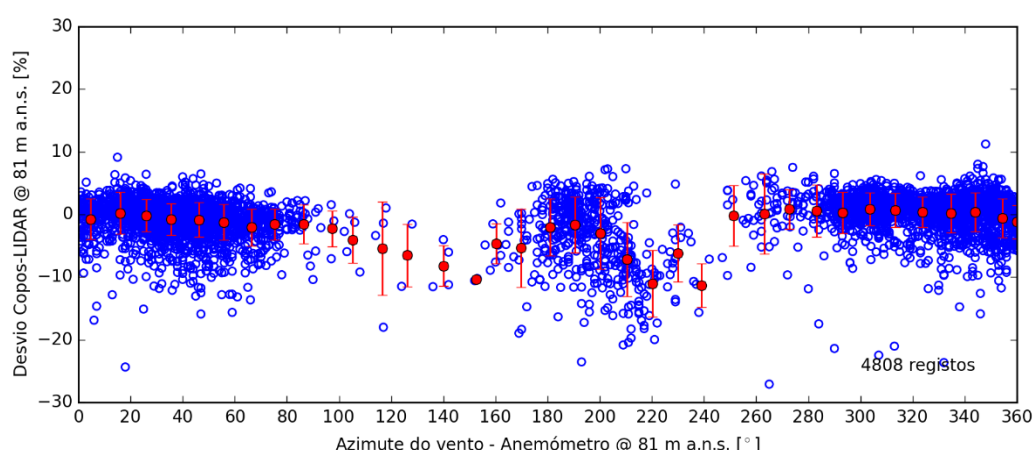


Figura 45 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 81 m a.n.s., em função do azimute do vento.

No entanto, quando analisadas as inclinações do escoamento em função do azimute do mesmo, não se encontra nenhuma tendência de inclinações mais acentuadas, para qualquer altura em estudo.

Também nesta campanha o desvio percentual das medições entre o anemómetro de referência e o LIDAR em função do *shear factor* apresenta tendências contrárias para diferentes alturas de medição. Similarmente ao que se observou na campanha da Aboadela, verifica-se uma sobrestimação da medição por parte do LIDAR para baixas alturas com o aumento do *shear factor*, e um aumento da subestimação do LIDAR com o aumento do *shear factor* para altura mais elevadas. Este fenómeno encontra-se representado nas figuras 46 e 47.

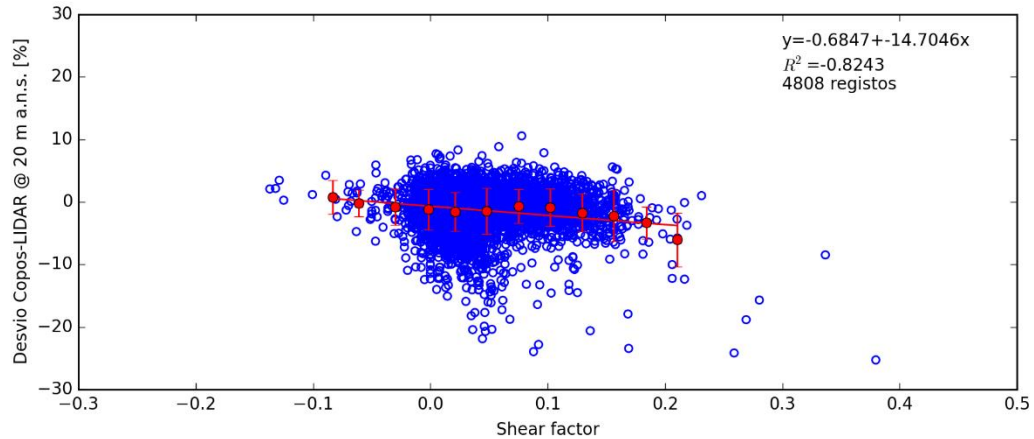


Figura 46 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 20 m a.s.l., em função do shear factor.

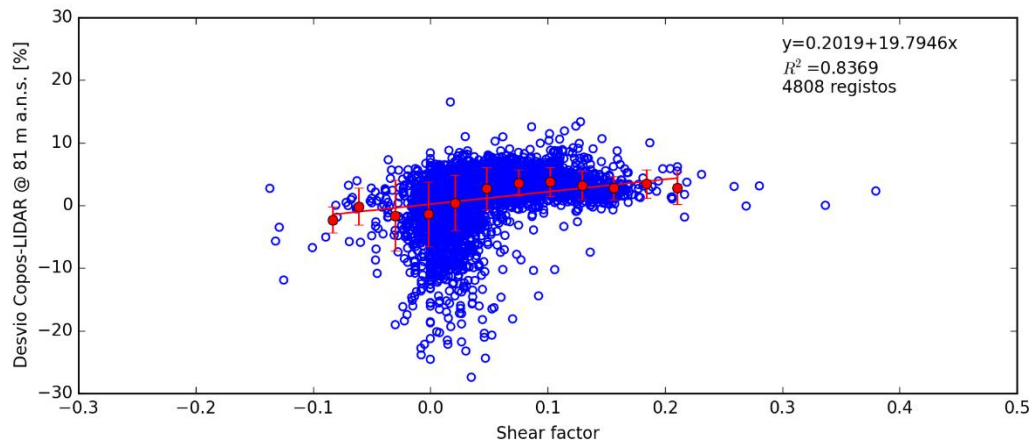


Figura 47 - Desvio das medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR a 81 m a.s.l., em função do shear factor.

Também o desvio em função da intensidade de turbulência apresenta uma tendência semelhante àquela que foi registada na campanha na Aboadela, com uma propensão para a sobrestimação da velocidade do vento pelo LIDAR com o aumento desta intensidade, para todas as alturas em estudo, mostrado na figura 48 para a altura de referência.

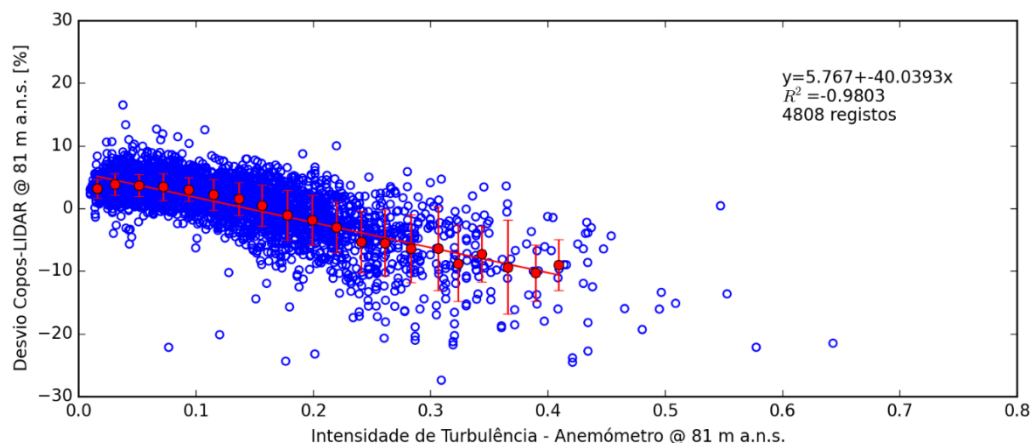


Figura 48 - Desvio das medições realizadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR a 81 m a.n.s., em função da intensidade de turbulência.

Analisando estes parâmetros em conjunto observa-se que a sobrestimação do LIDAR, nesta campanha de medição, está relacionada com intensidades de turbulência elevadas e *shears* baixos. Uma análise mais profunda destes parâmetros confirma esta hipótese, como é possível observar na figura 49.

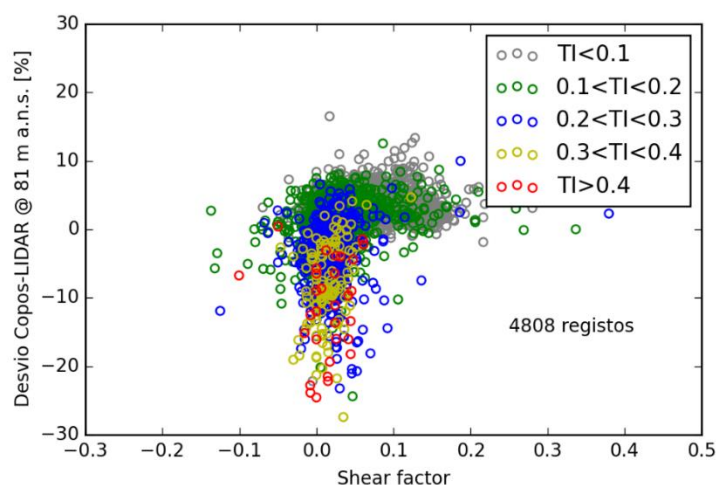


Figura 49 - Relação entre o shear factor e a intensidade de turbulência no desvio entre as medições de referência e do LIDAR

A análise do RIX nesta campanha de medição já mostrou um erro sistemático com uma tendência para sobrestimar a velocidade do vento por parte do LIDAR, como é possível observar nas figuras 50 e 51. Nesta campanha esta tendência é mais acentuada devido à existência de setores pouco influenciados pelo terreno envolvente, e outros em que esta influência é mais acentuada, tendo sido o RIX médio dos setores 13,6. Assim, é possível fazer uma comparação mais objetiva da influência do RIX nas medições. Para RIXs baixos as medições apresentam desvios na ordem dos $\pm 10\%$. Assim que o RIX ultrapassa valores de 10%, começam-se já a observar desvios superiores a 15%. Quando este parâmetro ultrapassa os 20%, as medições efetuadas pelo LIDAR são sobrestimadas quase na sua generalidade. Também se observa que este fator, tal como na campanha da Aboadela, vai perdendo influência nas medições para alturas mais elevadas de medição.

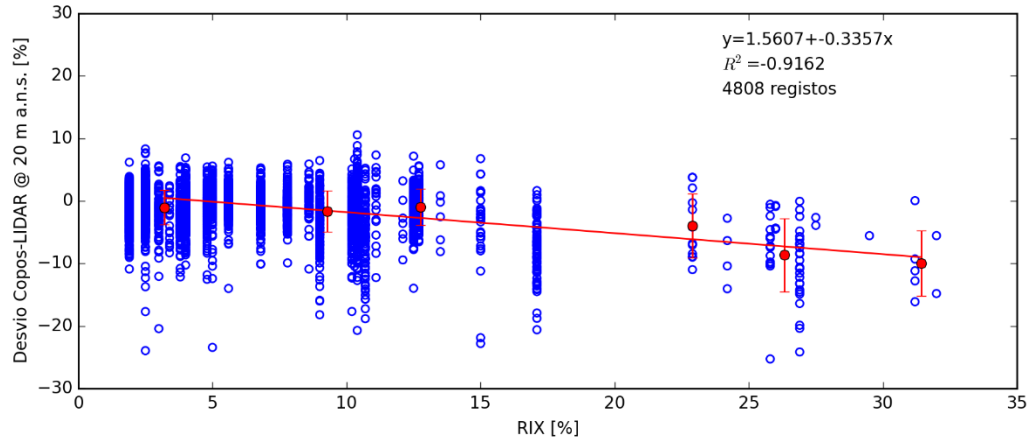


Figura 50 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 20 m a.n.s., em função do RIX.

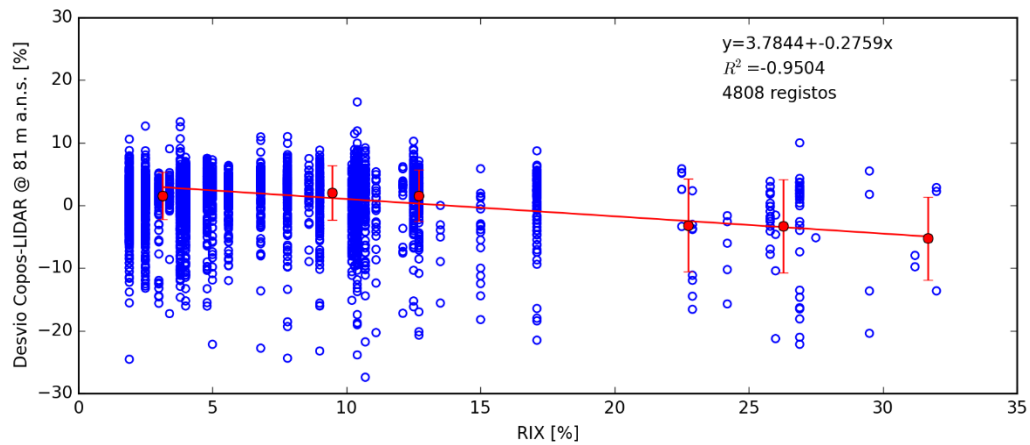


Figura 51 - Desvio entre as medições de referência e do LIDAR, a 81 m a.n.s., em função do RIX.

De maneira semelhante ao que foi verificado para o RIX, também nesta campanha se denota uma tendência mais acentuada de aumento do desvio com o aumento do declive médio do setor de medição.

A tendência de variação do desvio das medições em função do gradiente térmico também se mantém, com uma tendência de sobrestimação da medição por parte do LIDAR para gradientes positivos, e uma mínima subestimação da medição para gradientes negativos, como é possível verificar na figura 52. Analogamente ao que foi observado na outra campanha, o desvio das medições é mais acentuado para medição a maiores alturas a.n.s.

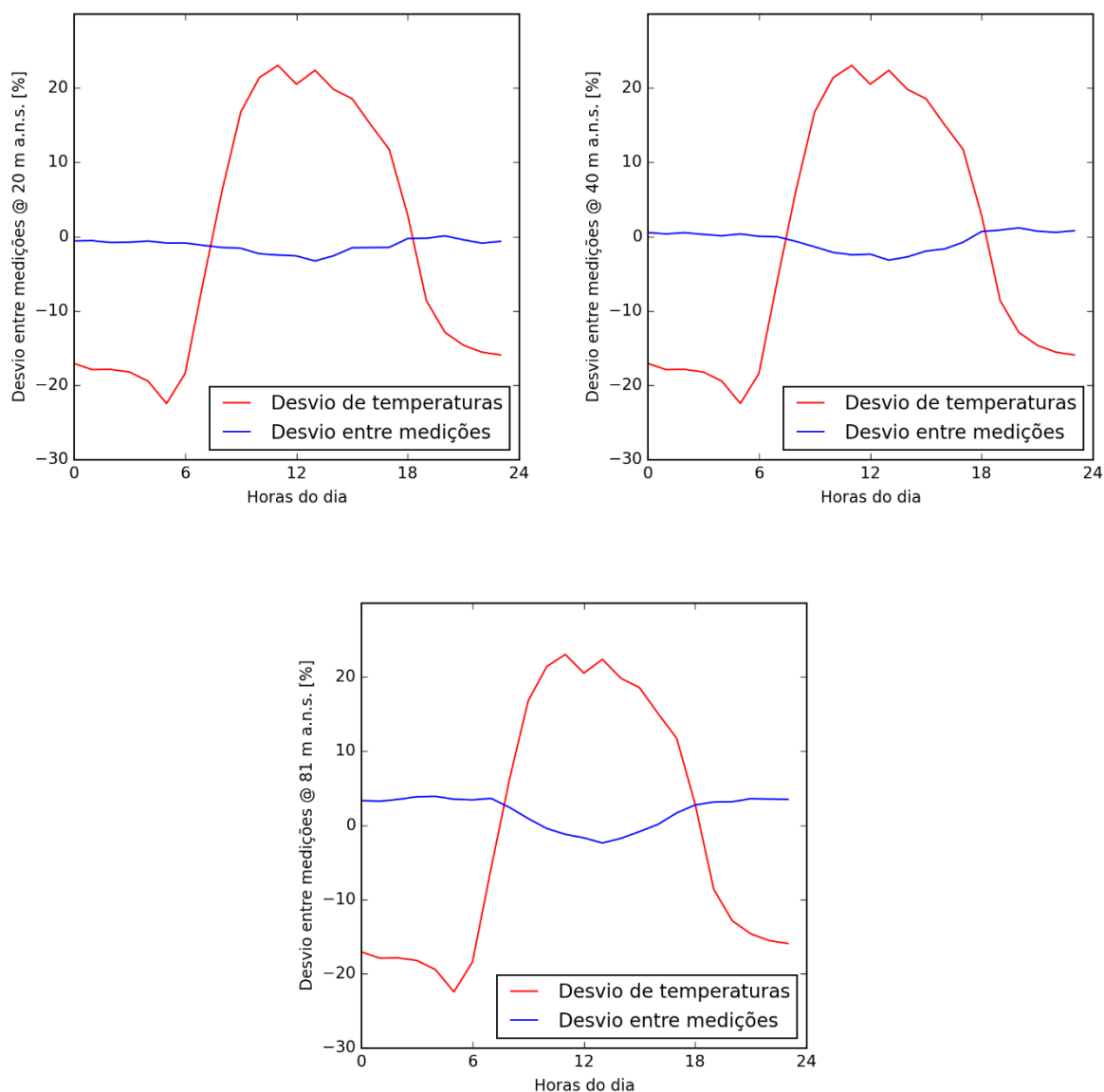


Figura 52 - Desvio percentual das medições entre o anemômetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor a 75 m a.n.s., em função da hora do dia.

5.2.5 Conclusões

Nesta campanha de medição, a análise à intensidade de turbulência revela uma tendência constante de aumento do desvio com o aumento deste parâmetro para todas as alturas acima do nível do solo. Já no que toca ao shear factor identificam-se, novamente, tendências contrárias para as distâncias de medição extremas analisadas.

Nesta campanha de medição, visto existirem RIX baixos em alguns setores, foi possível observar-se uma tendência mais acentuada de aumento do desvio entre medições com o aumento deste parâmetro.

No que respeita ao gradiente térmico, também nesta campanha se revela de maneira semelhante ao que se observou na Aboadela, com a sobrestimação da velocidade do vento por parte do LIDAR em horas de maior gradiente. Também neste caso, o aumento da distância de medição acentua esta tendência.

5.3 Comparação de resultados

A comparação dos resultados obtidos em ambas as campanhas, como era de esperar, não foi fácil devido à diferente complexidade que os dois terrenos apresentam. A diferente duração das duas campanhas também não foi um fator auxiliar nesta comparação.

A filtragem de resultados realizada, embora tenha encurtado os dados obtidos de maneira muito significativa, no que se refere à campanha de medição na Aboadela, não entrou em conflito com o que é citado na norma IEC 61400. Nesta, é mencionado que a quantidade de dados adquiridos deve cobrir um mínimo de 180 horas, ou seja, 7,5 dias. A filtragem realizada, em ambas as campanhas realizadas, deixou-nos com registos referentes a mais de 30 dias. É possível também, desde logo, notar que a disponibilidade foi muito mais reduzida para a campanha na Aboadela, onde a campanha se desenrolou durante um intervalo temporal muito maior, e num terreno de orografia muito mais complexa do que o que foi realizado na campanha em Vale de Estrela. Isto ilustra claramente as maiores dificuldades de medição destes dispositivos neste tipo de terrenos.

Em primeiro lugar, a tendência de aumento do desvio entre medições com o aumento da intensidade de turbulência é óbvia, estando claramente evidenciada em ambas as campanhas, como é possível verificar nas figuras 53 e 54, para a altura de referência de cada campanha.

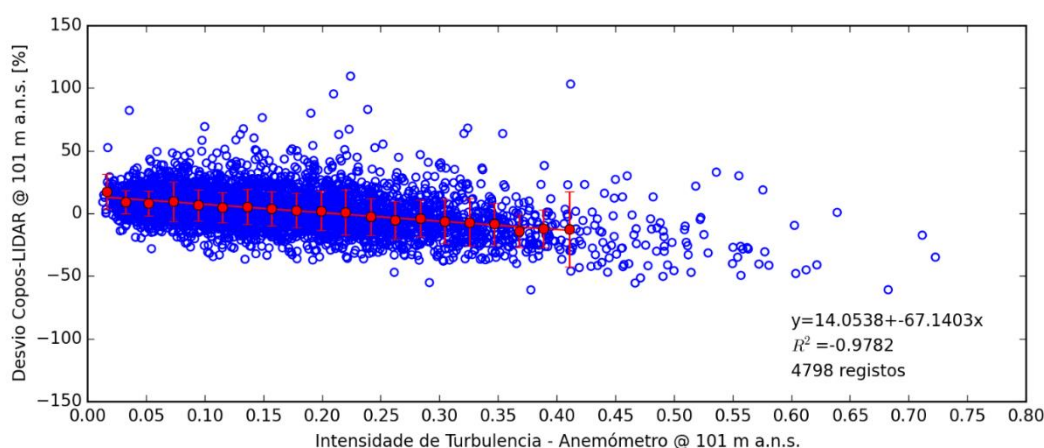


Figura 53 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela, a 101 m a.s.l., em função da intensidade de turbulência.

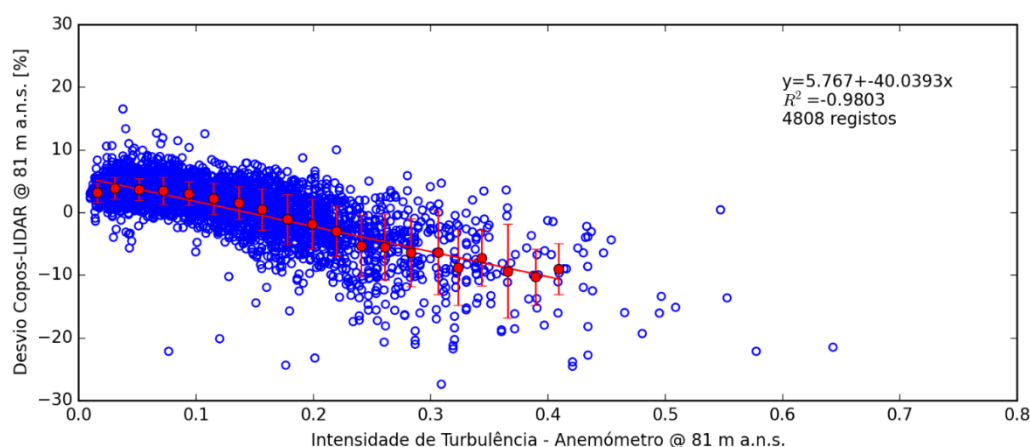


Figura 54 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR na campanha em Vale de Estrela, a 81 m a.s.l., em função da intensidade de turbulência.

Também a influência do *shear factor* nos desvios entre medições com os anemômetros de copos e com o LIDAR foi semelhante em ambas as campanhas, com tendências contrárias para os níveis de medição extremos analisados, como se encontra ilustrado nas figuras 55 e 56, para o caso da campanha na Aboadela.

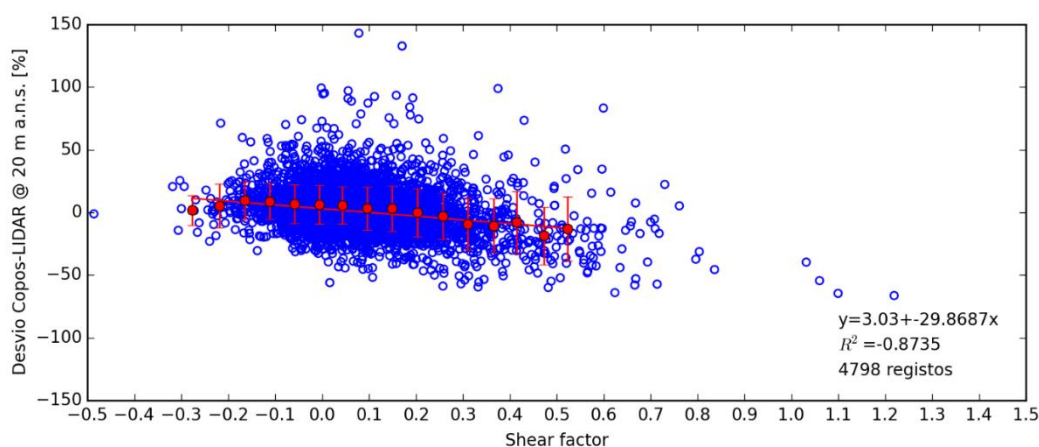


Figura 55 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela a 20 m a.n.s., em função do *shear factor*.

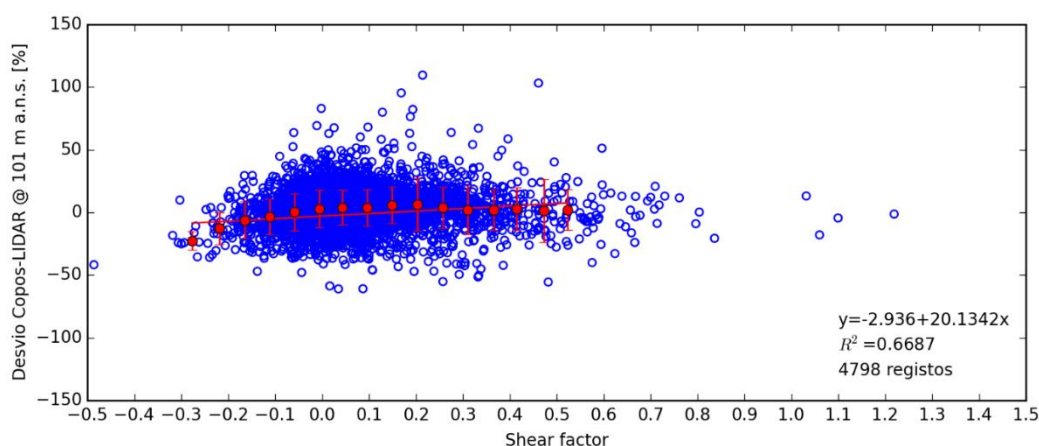


Figura 56 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela a 101 m a.n.s., em função do *shear factor*.

Podemos, então, concluir que o aumento destes dois parâmetros levará ao aumento do desvio entre as medições efetuadas pela anemometria de copos e o LIDAR. Para a intensidade de turbulência esta tendência é constante, enquanto que para o *shear factor*, a tendência apresenta de desvio se vai alterando em função da altura de medição. Assim, é de supor que existirá uma altura a.n.s. na qual o aumento do *shear* não levará ao aumento do desvio registado entre medições.

No que se refere ao RIX do local, a análise feita a este parâmetro na campanha da Aboadela ilustrou uma certa tendência de aumento do desvio entre medições com o aumento deste. No entanto, e como foi anteriormente referido, a alta complexidade deste local não permitiu evidenciar uma tendência mais acentuada, uma vez que, para qualquer direção em análise, o RIX é elevado. Em Vale de Estrela, devido à existência de setores com orografia menos complexa, a tendência é bem mais evidenciada. Aqui, a existência de setores cujo RIX apresenta um valor pequeno, e outros setores onde este parâmetro apresenta um valor mais elevado, possibilita uma comparação dos desvios entre medições ocorridos em ambas as situações.

Assim, pode-se concluir que o aumento do RIX levará a um aumento no desvio entre as medições efetuadas, como se verifica nas figuras 57 e 58. Esta tendência foi semelhante quando se analisou o desvio entre medições em função do declive médio por setor de 10°.

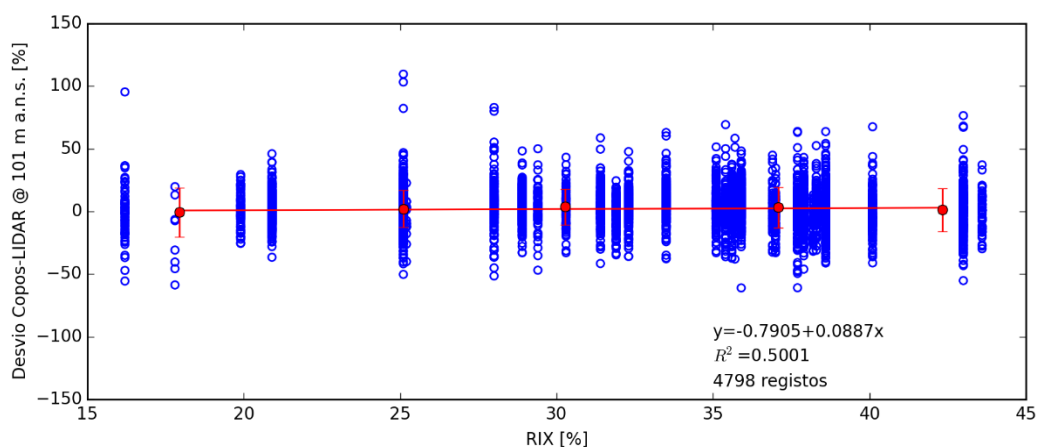


Figura 57 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR na campanha na Aboadela, a 101 m a.s.l., em função do RIX.

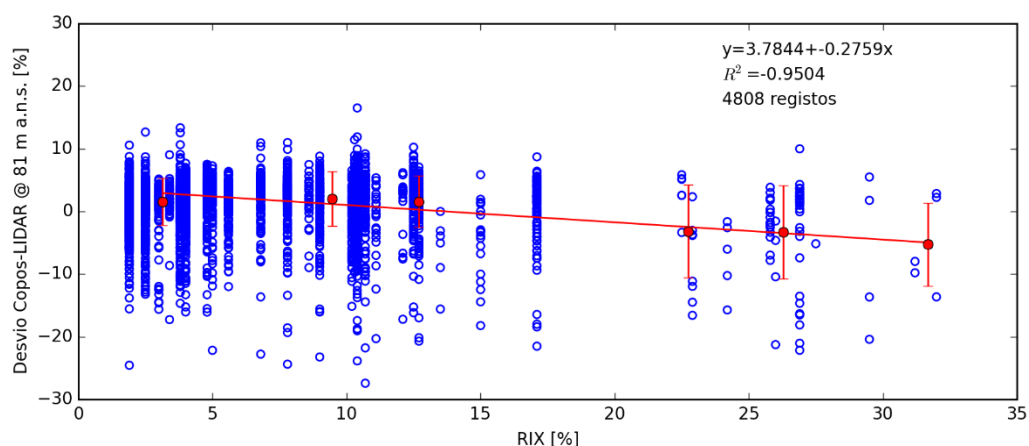


Figura 58 - Desvio entre as medições realizadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR na campanha em Vale de Estrela, a 81 m a.s.l., em função do RIX.

Relativamente ao gradiente térmico, foi evidenciada uma tendência relativa a períodos de gradiente positivo. Nestes, o LIDAR apresentou uma propensão para sobrestimar a velocidade do escoamento atmosférico. Mais interessante ainda foi a tendência observada em que, assim que o gradiente térmico passa a ter sinal positivo, o LIDAR começa a sobrestimar a velocidade do escoamento atmosférico, o que é observado na figura 59, relativamente às duas campanhas de medição efetuadas.

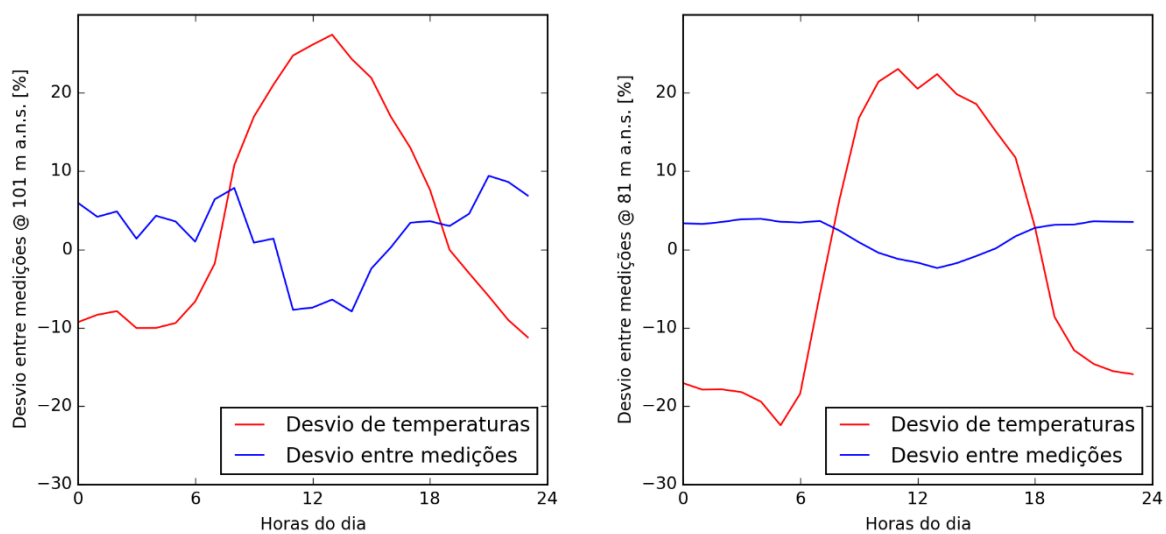


Figura 59 - Desvio percentual das medições realizadas à altura de referência entre o anemómetro de referência e o LIDAR e entre as temperaturas medidas pelo LIDAR e pelo sensor instalado na torre de medição, em função da hora do dia, para a campanha na Aboadela (esquerda) e em Vale de Estrela (direita).

6 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

6.1 Conclusões

No decorrer desta dissertação foram abordados assuntos relacionados com a caracterização do recurso eólico em terrenos de complexidade elevada, recorrendo a sistemas de medição remota LIDAR. De maneira a estudar a influência destes terrenos nas medições efetuadas por este tipo de instrumentação, foram utilizados dados de duas campanhas de medição em terreno complexo: uma na Aboadela e outra em Vale de Estrela.

Analisando os resultados obtidos em ambas as campanhas de medição, a influência exercida pela complexidade do terreno nas medições é evidente, com a campanha na Aboadela a mostrar um grau de dispersão de dados muito superior à dispersão evidenciada em Vale de Estrela.

A não homogeneidade do escoamento nestes terrenos leva ao aparecimento de ventos com componentes verticais de velocidade não nula, e à amplificação de fatores como a intensidade de turbulência e *shear factor*. Como foi visto, o aumento destes parâmetros leva a um aumento dos desvios entre as medições efetuadas. Não nos podemos também esquecer que as medições efetuadas por estes são realizadas num volume de prova muito superior àquele em que os anemómetros medem, pelo que a influência do terreno nas mesmas pode ser exponenciada.

A substituição de torres de medição convencionais por LIDARs para a caracterização do escoamento atmosférico em terreno complexo é um cenário que ainda levará o seu tempo a acontecer. A popularidade destes sistemas está em claro crescimento, prova disso é a inclusão na norma IEC do anexo relativo à utilização destes instrumentos na caracterização do recurso eólico. No entanto, a confiança nos resultados obtidos ainda se encontra aquém do pretendido, pois, embora estes sistemas de medição se comportem de maneira muito satisfatória em terrenos planos, a sua performance ainda deixa muito a desejar fora destes, como foi observado no desenvolvimento desta dissertação. A baixa disponibilidade apresentada por estes dispositivos em terreno complexo também é um fator que diminui significativamente a confiança nos resultados obtidos.

6.2 Trabalhos futuros

No que diz respeito a possibilidades de trabalho futuro, seria conveniente a comparação de resultados obtidos numa gama temporal mais alargada, de modo a poderem ser comparados resultados entre dois períodos extremos, como o verão e inverno. Seria interessante, também, a comparação dos dados obtidos na campanha de medição da Aboadela com dados obtidos num terreno com complexidade semelhante. Desta forma seria possível comparar se os desvios entre medições seriam oriundos de fatores semelhantes.

A comparação de dados obtidos entre LIDARs de feixe contínuo, LIDARs de feixe pulsado e *WindScanners* seria também interessante, de maneira a perceber as vantagens e limitações de cada tipo de tecnologia em terreno complexo.

Finalmente, a utilização do LIDAR como estação móvel em terreno complexo seria também um cenário a ter em mente. Desta maneira, seria possível estudar a influência de diversos fatores orográficos na mesma campanha de medição, para o mesmo LIDAR.

Referências

- [1] Bingöl, F. (2009). Risø-PhD-Report, Complex Terrain and Wind Lidars.
- [2] Wagner, R., & Courtney, M. (2011). Accounting for the speed shear in wind turbine power performance measurement.
- [3] Davenport, A.G. (1960). Rational for determining design wind velocities. Proceedings of the American society of civil engineers, Journal of the structural division.
- [4] Vasiljević, N. (2014). A time-space synchronization of coherent Doppler scanning lidars for 3D measurements of wind fields.
- [5] Wagner, R. et al (2009). Investigation of turbulence measurements with a continuous wave, conically scanning LiDAR.
- [6] Riso DTU. Wind Lidars – a practical course Introduction. (2011, May)
- [7] Salvador, P. (2012). Influência do perfil vertical de velocidades no funcionamento de um aerogerador - Medições realizadas com LIDAR.
- [8] MTC Final Progress Report : LIDAR. [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265225292_MTC_Final_Progress_Report_LIDAR. [Acedido: 11-Jun-2017].
- [9] WINDCUBE VERTICAL PROFILING LIDAR. [Online]. Disponível em: <http://www.scanninglidar.com/windcube-vertical-profiler/>. [Acedido: 11-Jun-2017].
- [10] INTERNATIONAL STANDARD, Wind energy generation systems –Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (2017).
- [11] Vasiljević et al (2017). Perdigoão 2015: methodology for atmospheric multi-Doppler lidar experiments. Atmospheric Measurement Techniques Discussions.
- [12] Gylling, N. (2008). Field validation of the RIX performance indicator for flow in complex terrain.
- [13] F. Bingöl et al (2008a). Lidar error estimation with wasp engineering.
- [14] F. Bingöl et al (2008b). Modeling conically scanning lidar error in complex terrain with WAsP Engineering.
- [15] Zhang, M. (2015). “Wind Resource Assessment and Micro-Siting: Science and Engineering”. WILEY.

ANEXO A: Caso de Estudo na Aboadela

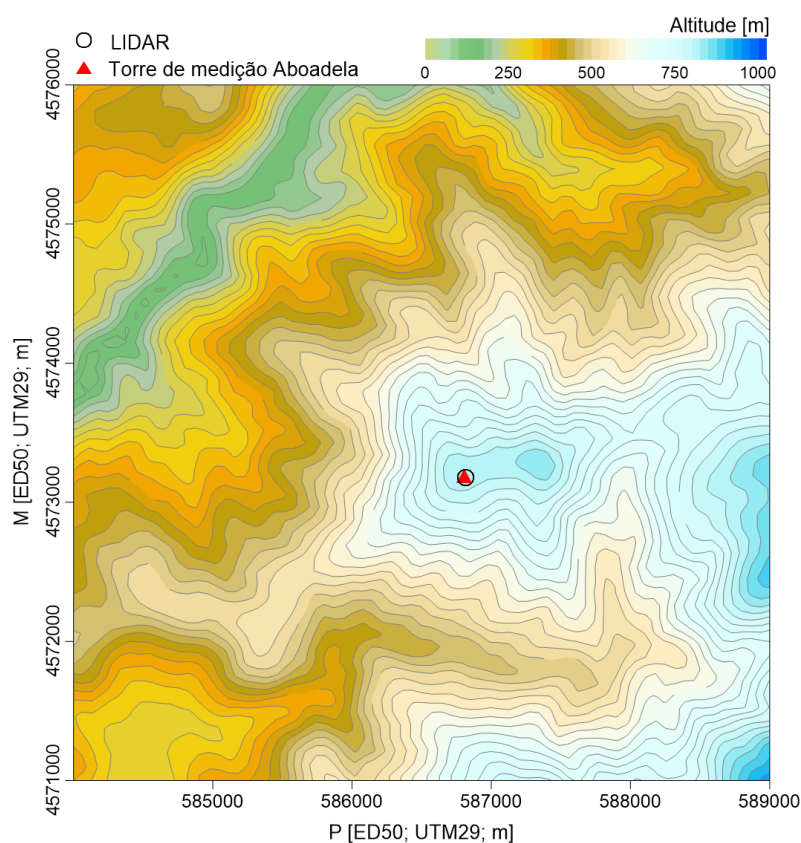


Figura 60 - Mapa topográfico do local onde foi efetuada a campanha de medição na Aboadela com localização da torre de medição e do LIDAR.

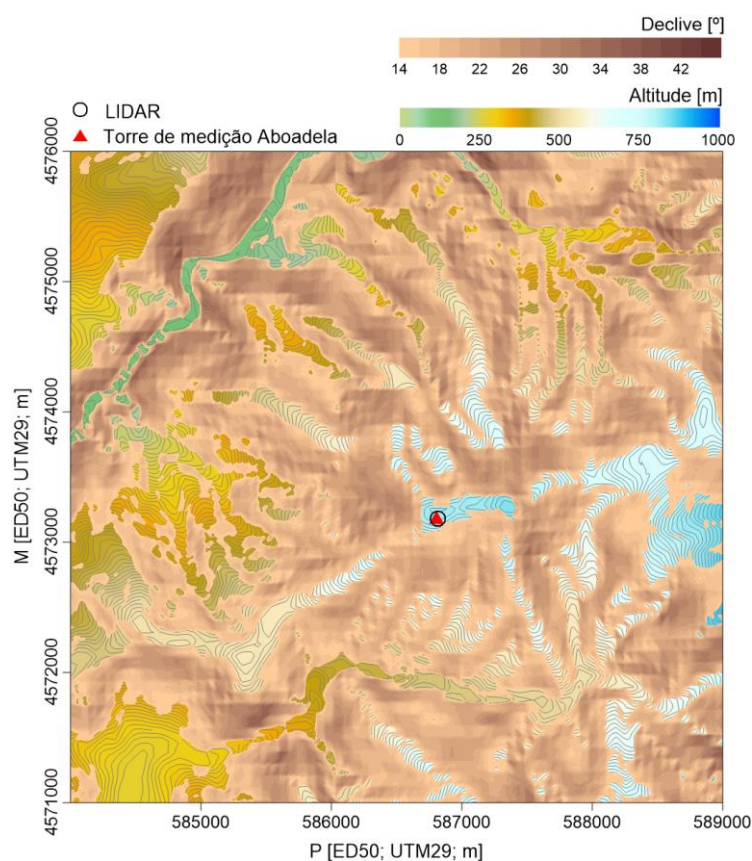


Figura 61 - Mapa de declive do local onde foi efetuada a campanha de medição na Aboadela com localização da torre de medição e do LIDAR.

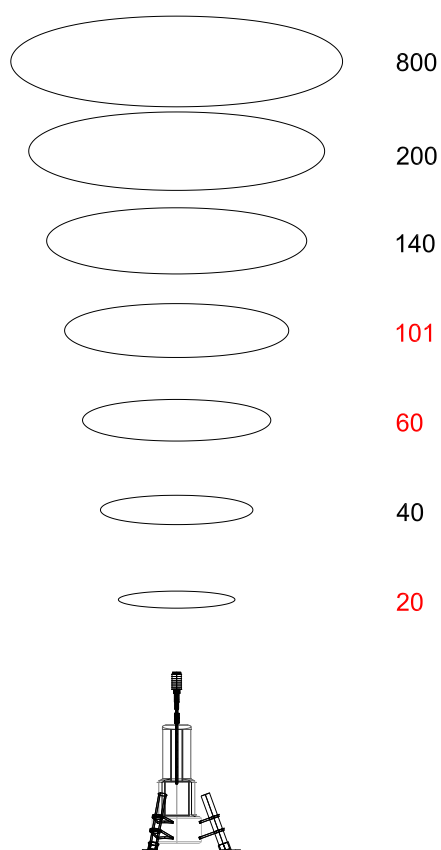


Figura 62 - LIDAR utilizado na campanha de medição na Aboadela. Alturas de medição em m a.n.s..

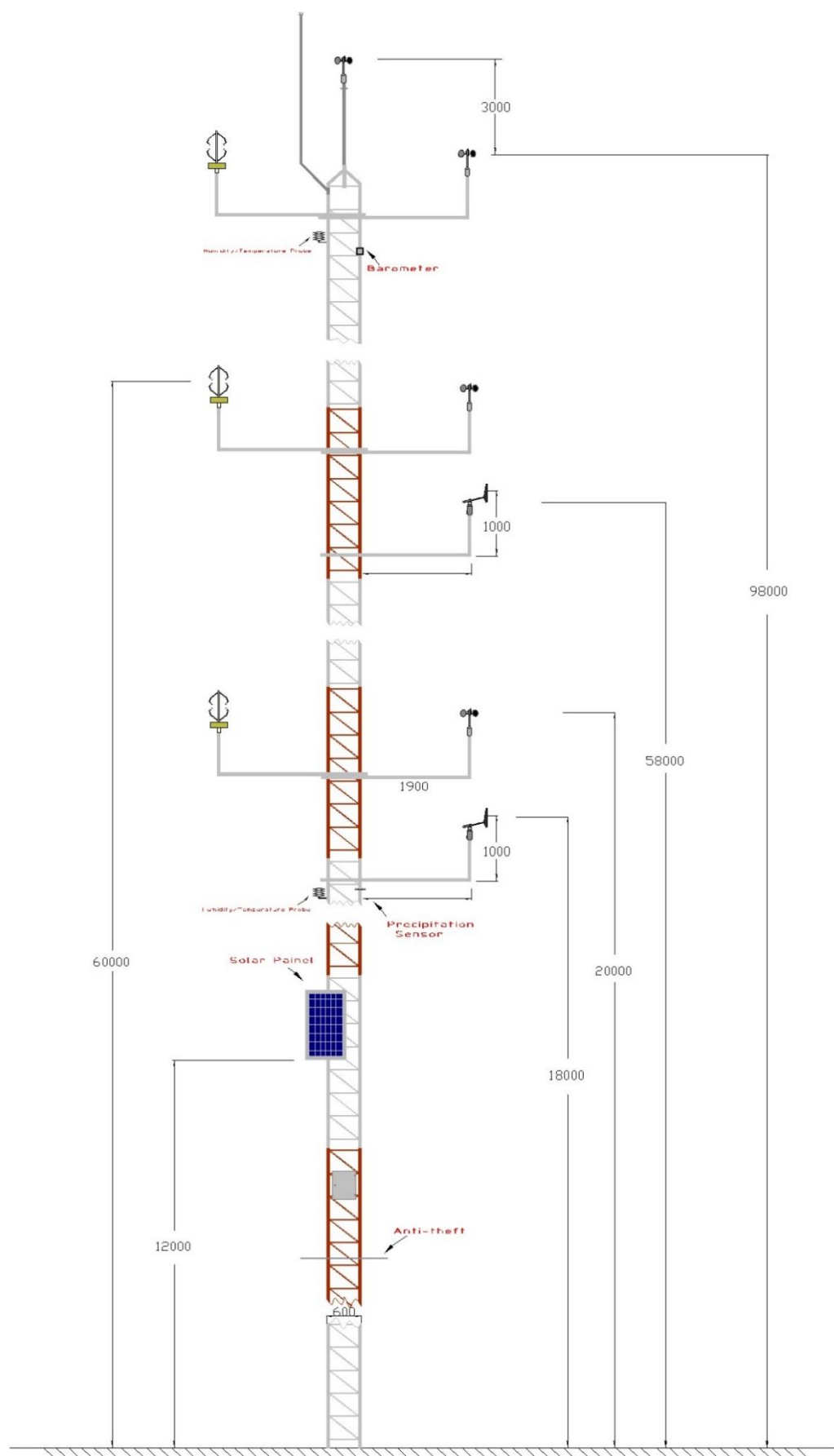


Figura 63 - Torre de medição utilizada na campanha de medição na Aboadela. Dimensões em mm.

ANEXO B: Caso de Estudo em Vale de Estrela

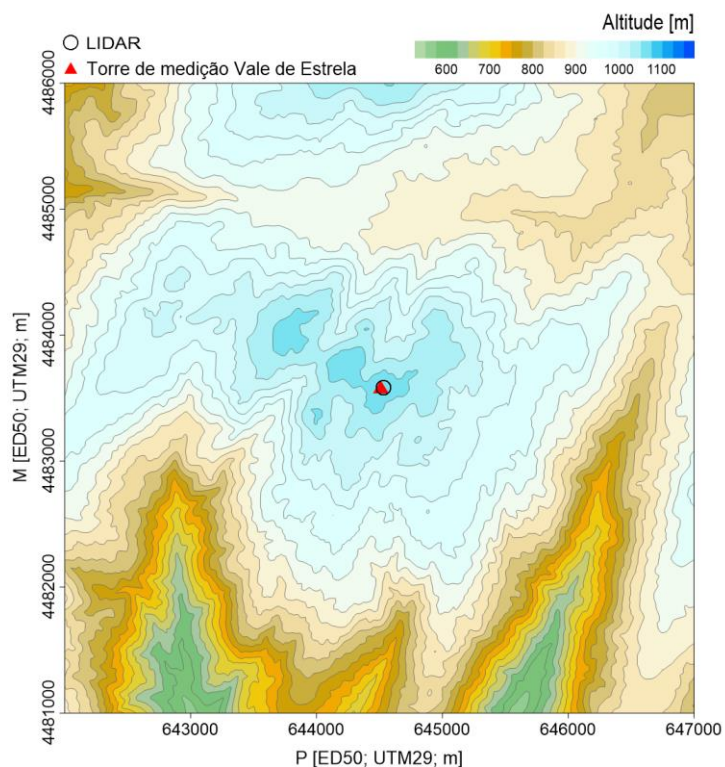


Figura 64 - Mapa topográfico do local onde foi efetuada a campanha de medição no Vale de Estrela com localização da torre de medição e do LIDAR.

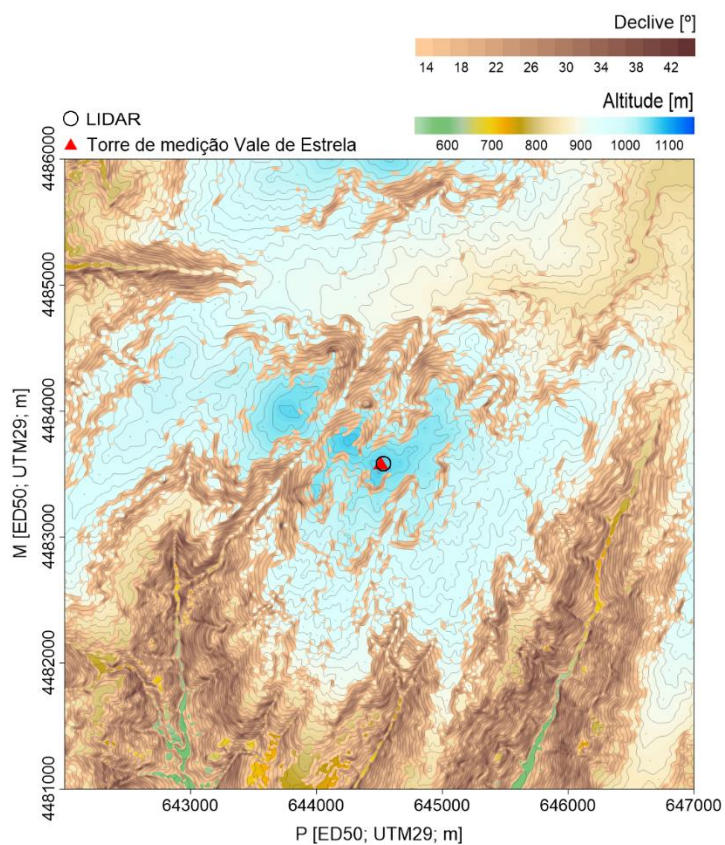


Figura 65 - Mapa de declive do local onde foi efetuada a campanha de medição no Vale de Estrela com localização da torre de medição e do LIDAR.

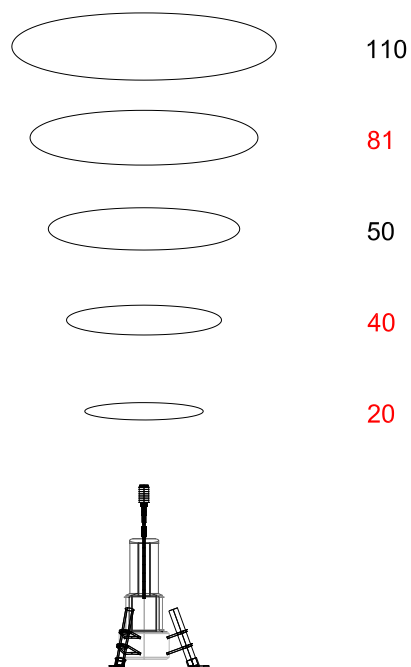


Figura 66 - LIDAR utilizado na campanha de medição em Vale de Estrela. Alturas de medição em m a.n.s..

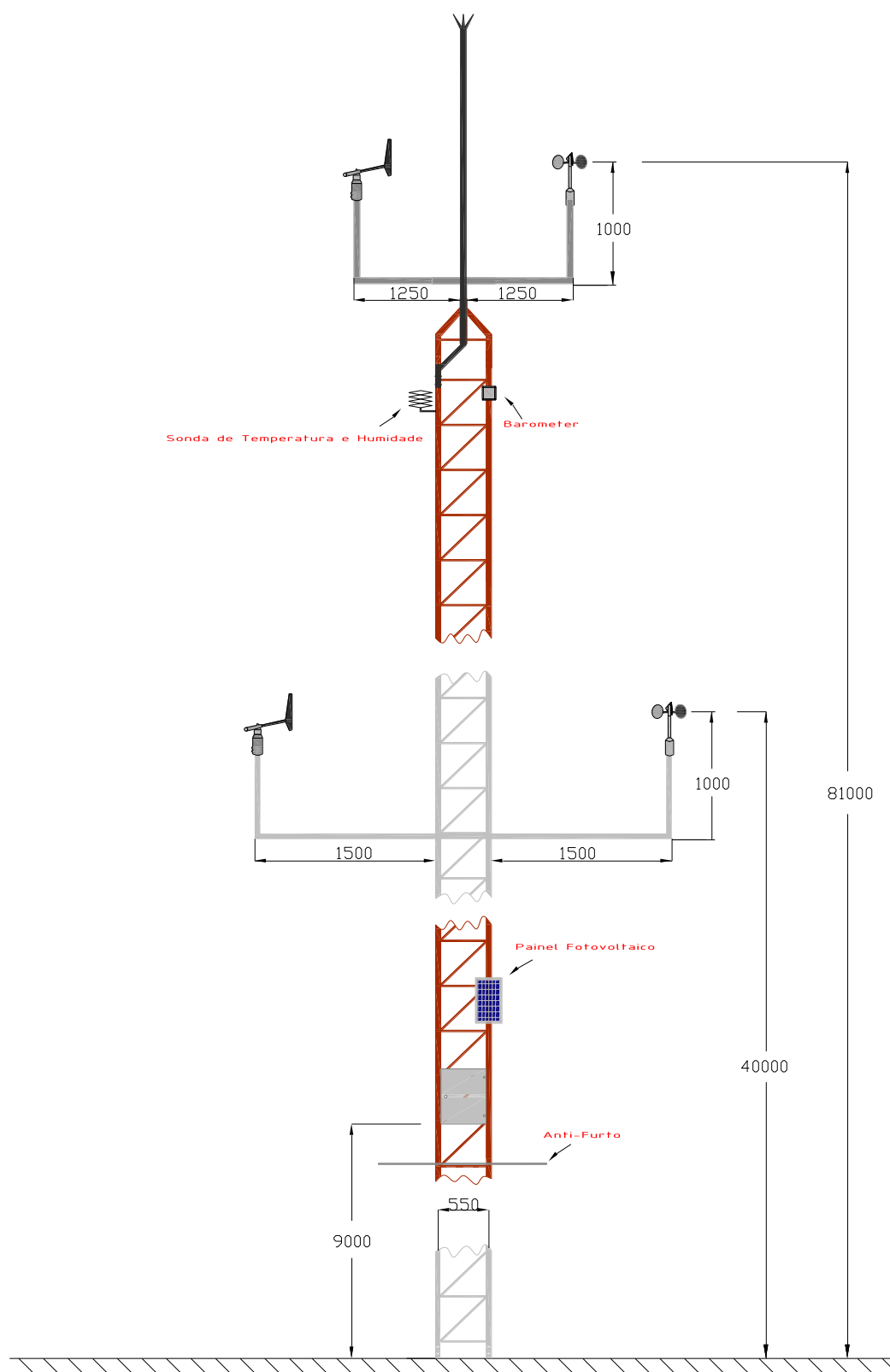


Figura 67 - Torre de medição utilizada na campanha de medição em Vale de Estrela. Dimensões em mm

ANEXO C: Filtros Utilizados

Direções Afetadas

Como foi referido ao longo da dissertação, para a avaliação dos sectores influenciados pela torre de medição, a norma IEC 61400 não foi seguida à risca, tendo-se eliminado apenas valores de azimuth com $\pm 20^\circ$, no lugar dos $\pm 45^\circ$ indicados pela norma.

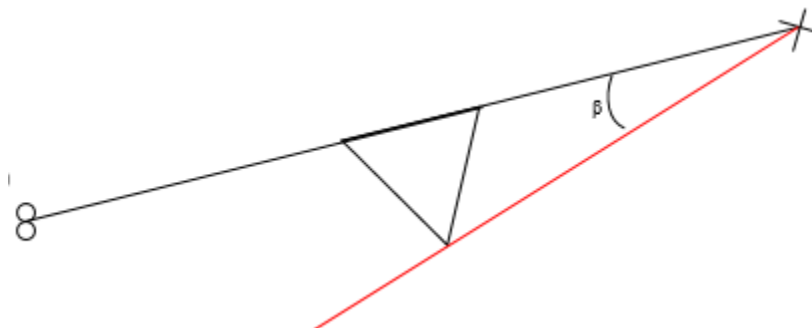


Figura 68 - Ângulo formado entre as duas extremidades das torres de medição

Uma vez que a haste na qual os anemómetros estão instalados dista 2 metros da extremidade da torre até ao anemómetro, e como cada face da torre possui 0,60 metros, o ângulo β é igual a $8,53^\circ$. Assim, tendo em conta a orientação da haste, os azimutes a eliminar para cada altura serão as indicadas na tabela 11. Para o caso da influência do para-raios no anemómetro de copos a 101 metros de altura, os azimutes a serem excluídos foram escolhidos da observação do desvio de valores entre o anemómetro em causa e o anemómetro sónico instalado a 98 metros de altura, figura 69, eliminando-se também um sector de 20° , em concordância com o que se havia feito previamente para a torre de medição.

Tabela 11 - Setores influenciados pela torre de medição e para-raios

Altura do sensor de direção [m]	Orientação da Haste do anemómetro de copos [°]	Limite inferior do sector influenciado [°]	Limite superior do sector influenciado [°]	Orientação da Haste do anemómetro sónico [°]	Limite inferior do sector influenciado [°]	Limite superior do sector influenciado [°]
18	257	48	97	77	228	277
58	257	48	97	77	228	277
98	258	35	55	78	229	278

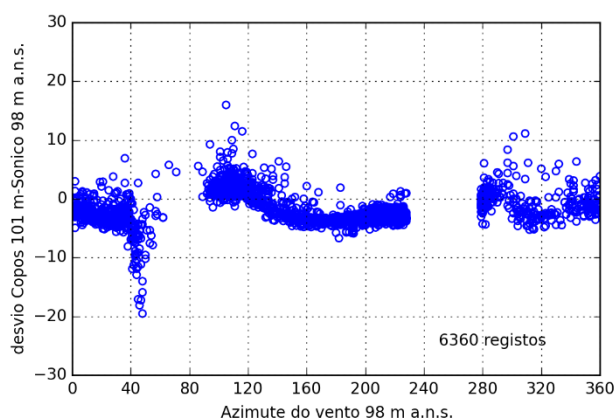


Figura 69 - Influência do para-raios nas medições efetuadas.

Humidade

Utilizando o sensor de humidade instalado a 97 metros como referência, é possível observar um desvio sistemático para valores próximos de 100%, para todas as alturas de comparação. Assim, optou-se por eliminar valores de humidade > 97%.

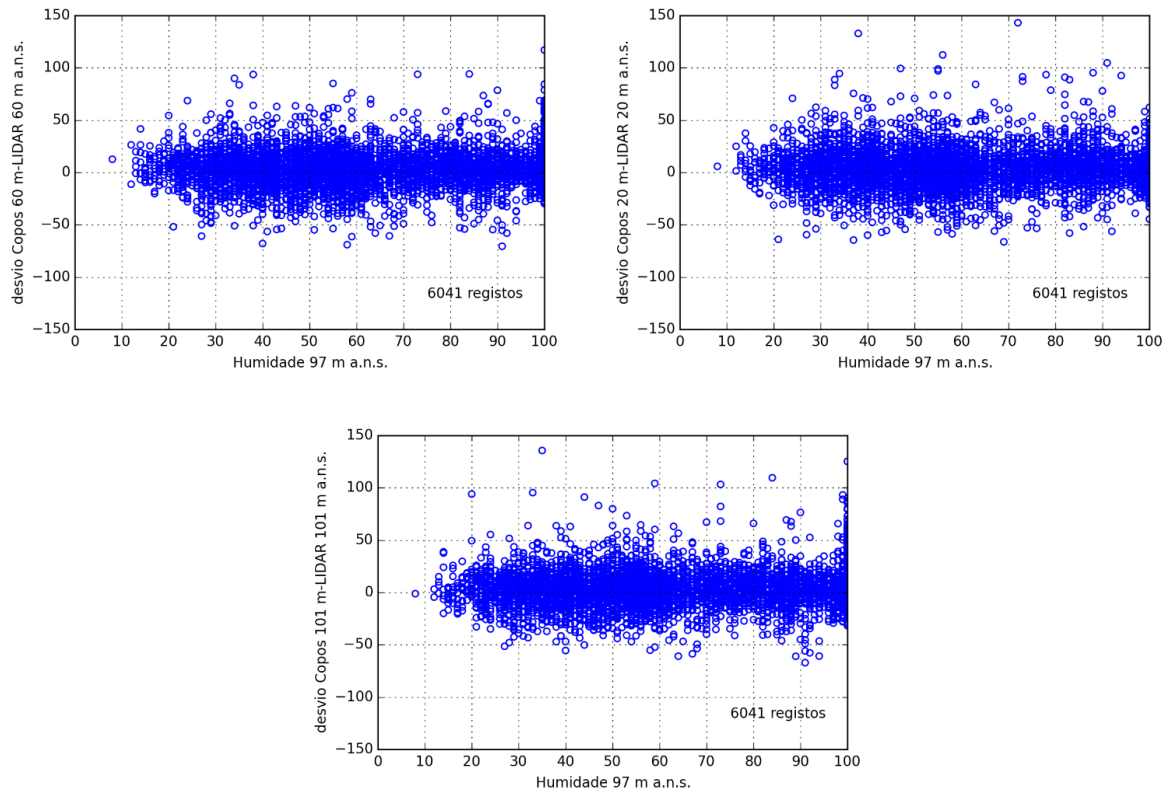


Figura 70 - Influência da humidades nas medições efetuadas

Spatial Variation

A análise do desvio em função do “*Spatial Variation*” revelou também uma dispersão de pontos mais acentuada quando esta variável apresentava valores superiores a 0,15. Assim, valores com “*Spatial Variation*” superiores a 0,15 foram também eliminados.

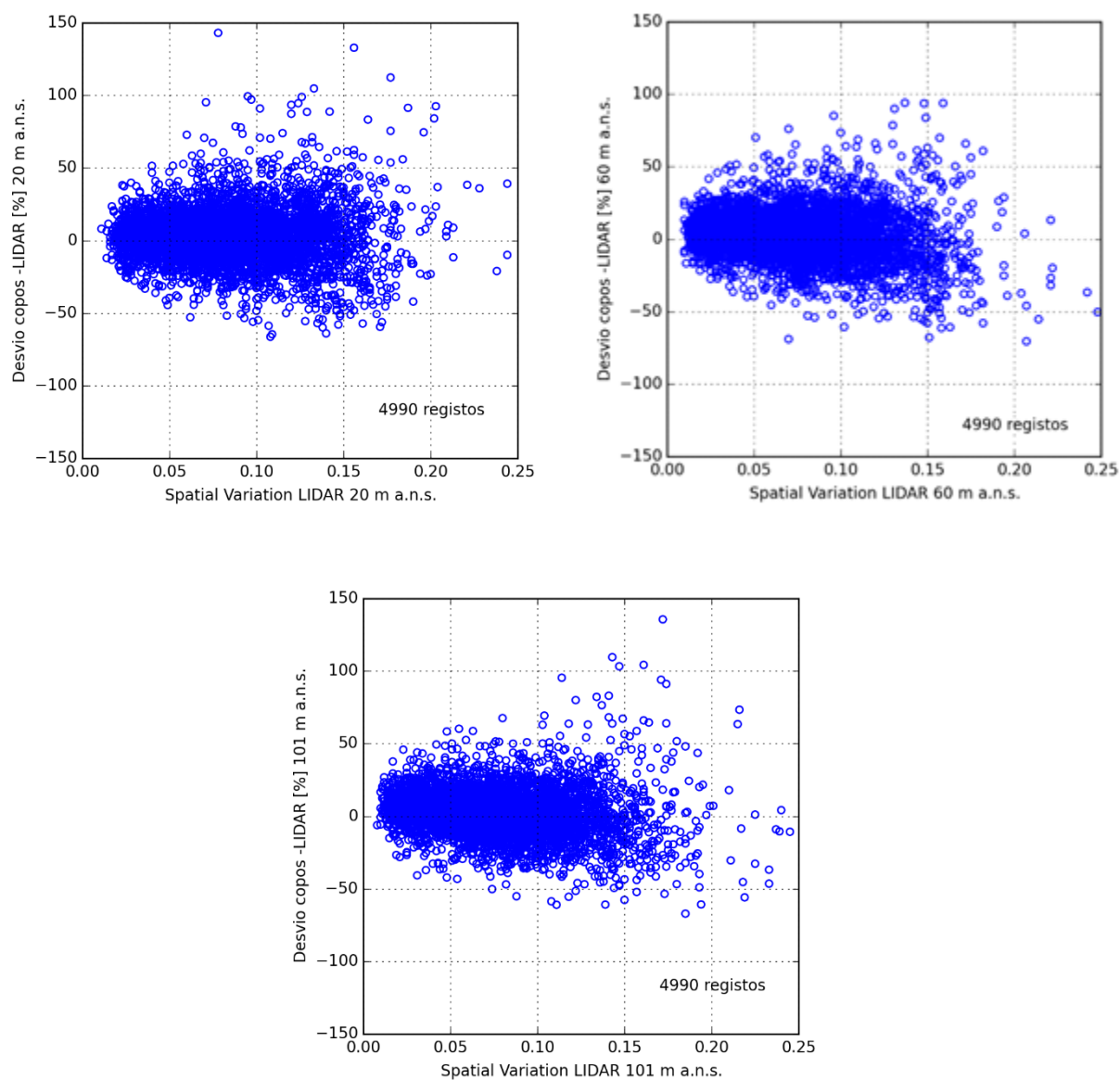


Figura 71 - Influência da *Spatial Variation* nas medições efetuadas

ANEXO D: Filtragem de dados obtidos - Aboadela

Filtro 1 – Mensagem de Erro, amostra inicial:22584 registros

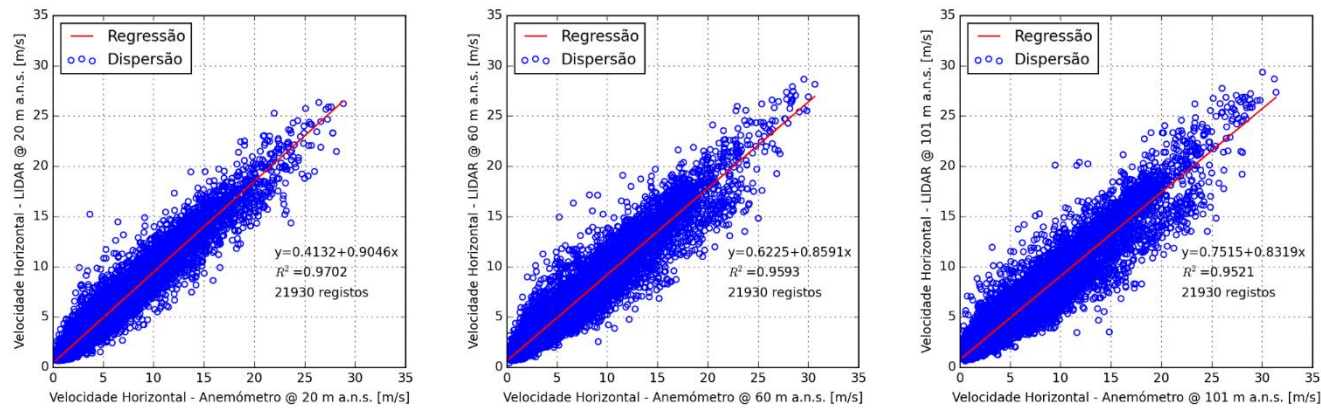


Figura 72 – Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 1, para 20, 60 e 101 m a.s.l..

Filtro 2 – “Status Flags”=“Green”, amostra inicial:21930 registros

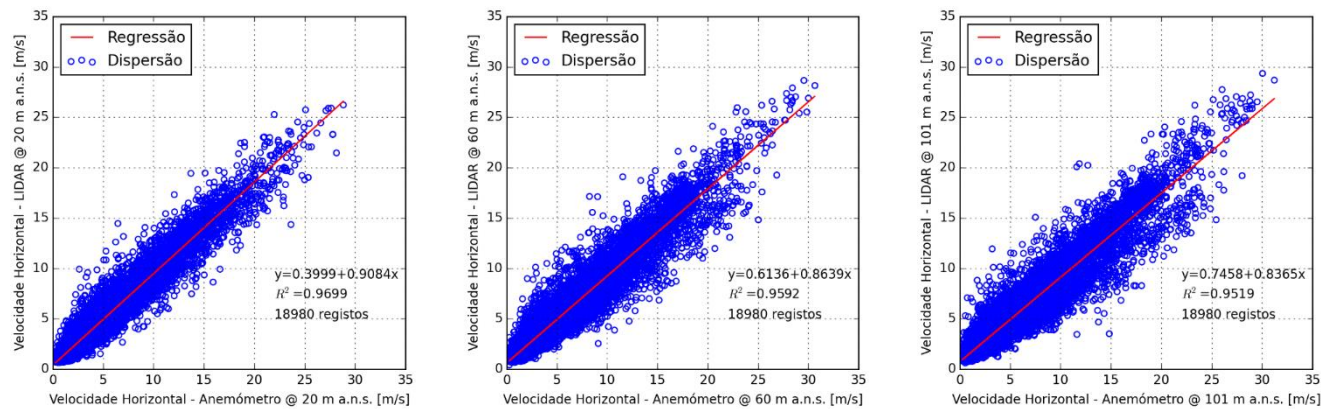


Figura 73 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 2, para 20, 60 e 101 m a.s.l..

Filtro 3 – Chuva (sensor do LIDAR) = 0, amostra inicial: 18980 registros

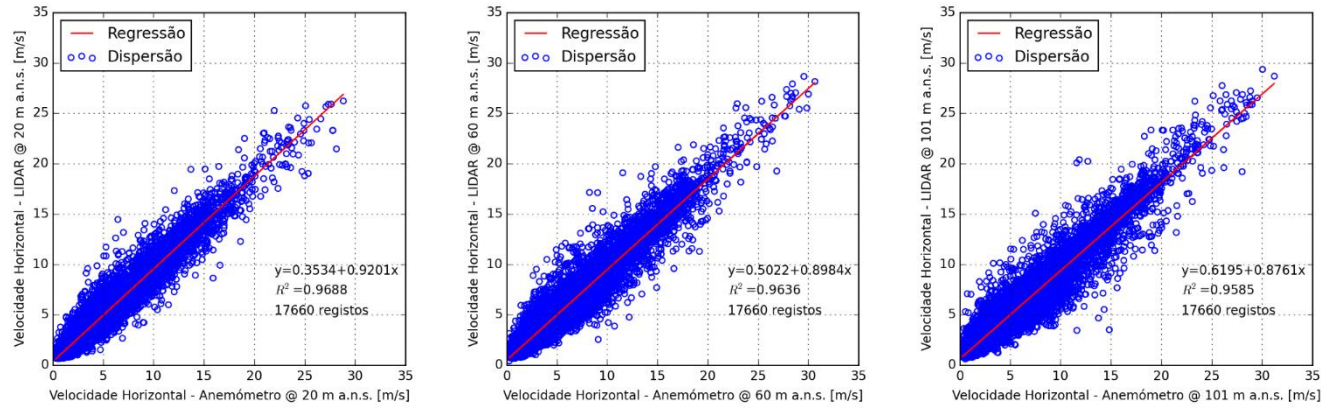


Figura 74 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 3, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

Filtro 4 – Velocidades do LIDAR superiores a 3m/s a 101 m de altura, amostra inicial: 17660 registros

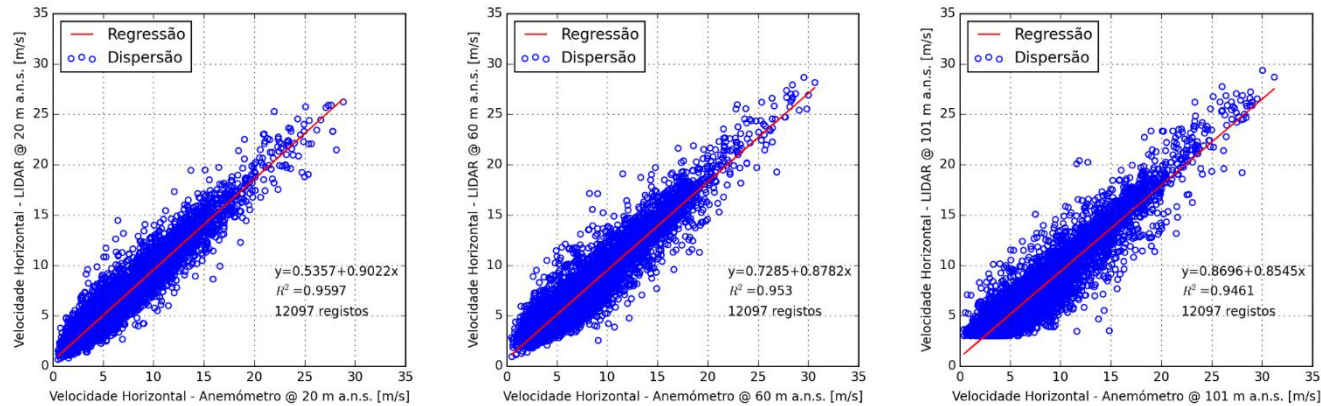


Figura 75 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 4, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

Filtro 5 – Velocidades do anemómetro de copos superiores > 3 m/s a 101 m de altura a.n.s., amostra inicial: 12097 registos

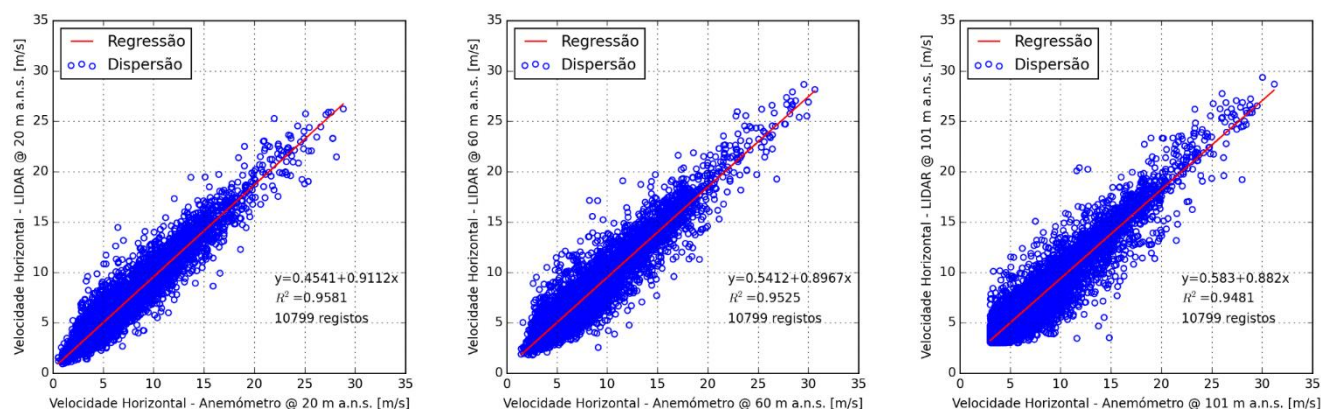


Figura 76 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 5, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

Filtro 6 – Direções influenciadas pela torre de medição e para-raios, Amostra inicial: 10799 registos

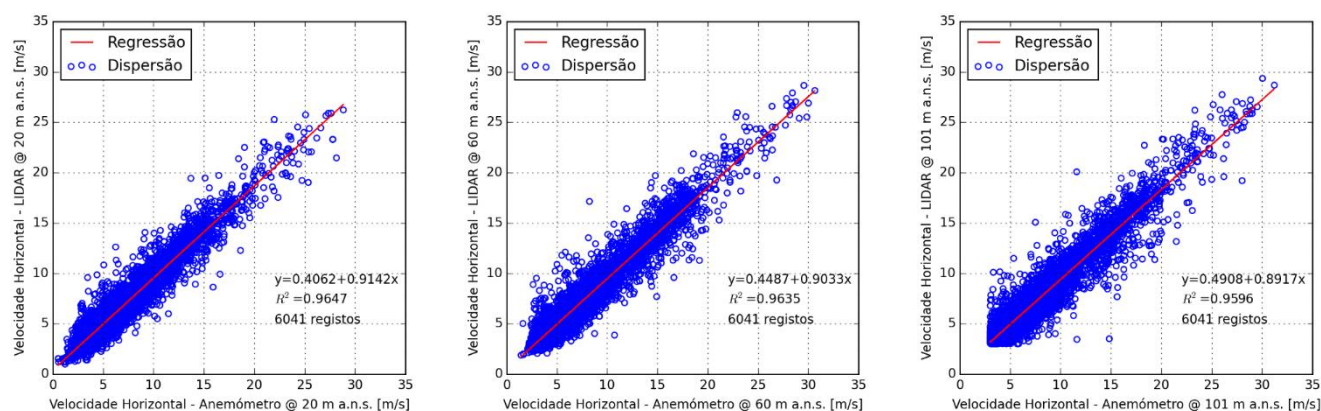


Figura 77 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 6, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

Filtro 7 – Humidade < 97%, Amostra inicial: 6041 registos

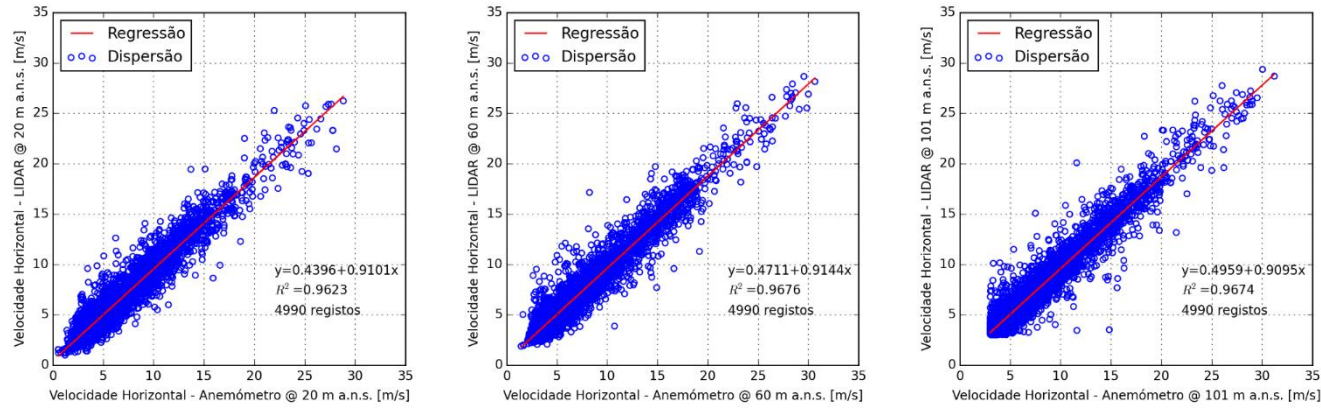


Figura 78 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 7, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

Filtro 8 – Spatial Variation < 0,15 , Amostra inicial: 4990 registos

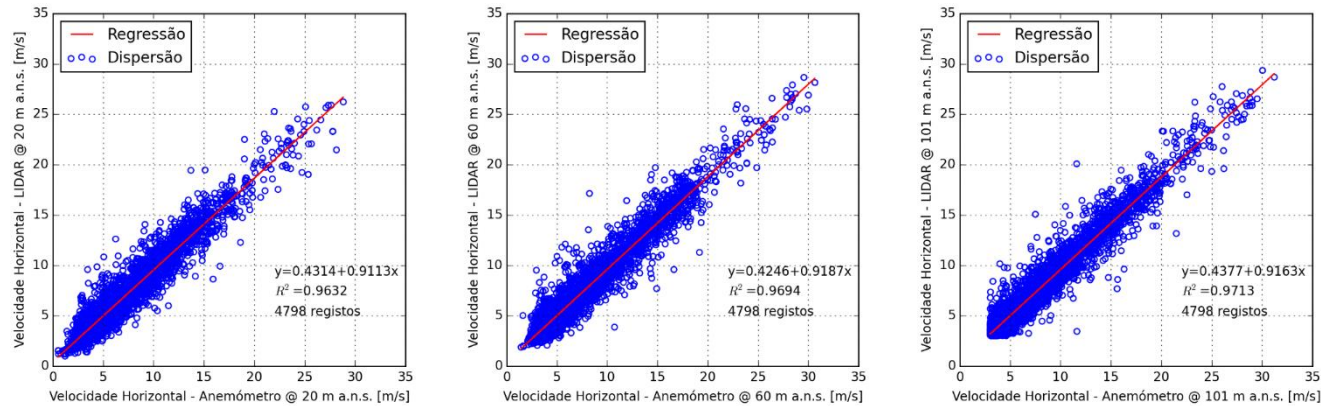


Figura 79 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 8, para 20, 60 e 101 m a.n.s..

ANEXO E: Filtragem de dados obtidos - Vale de Estrela

Filtro 1 - “Status Flags”= “Green”, Amostra inicial: 5215 registros

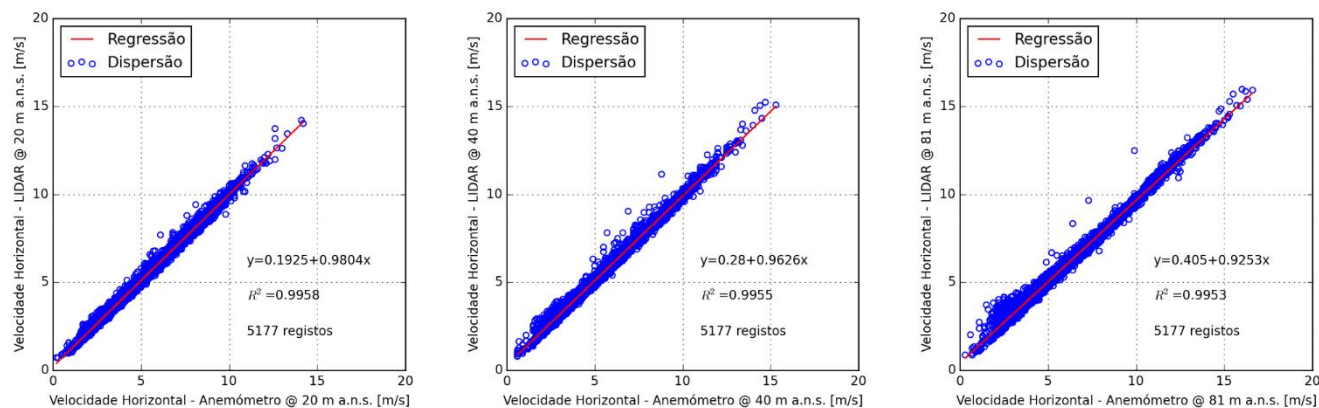


Figura 80 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 1, para 20, 40 e 81 m a.n.s..

Filtro 2- Velocidade LIDAR a 81 metros de altura < 3 m/s , Amostra inicial: 5177 registros

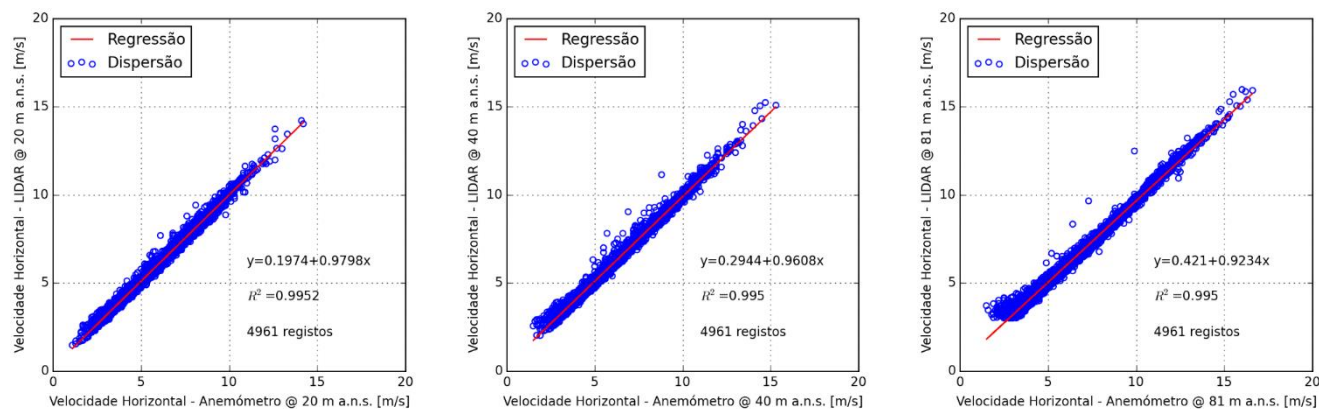


Figura 81 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 2, para 20, 40 e 81 m a.n.s.

Filtro 3 Velocidades do anemômetro de copos superiores > 3 m/s a 81 m de altura a.n.s., Amostra inicial: 4961 registros

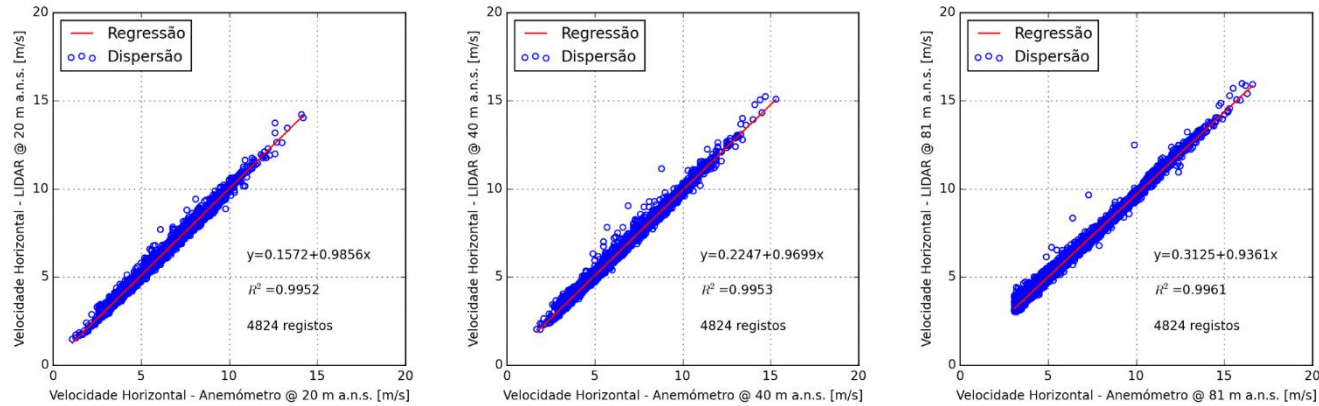


Figura 82 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 3, para 20, 40 e 81 m a.n.s.

Filtro 4 – Humidade < 97%, Amostra inicial: 4824 registros

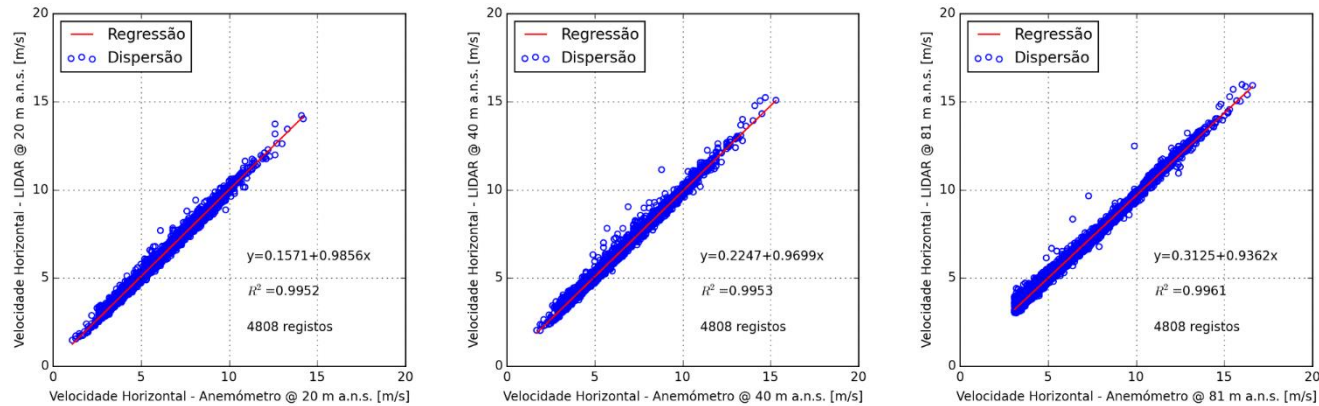


Figura 83 - Regressão linear entre as medições efetuadas pela anemometria de referência e LIDAR efetuada após a aplicação do filtro 4, para 20, 40 e 81 m a.n.s.

ANEXO F: Testes de Sensibilidade - Aboadela

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do azimute do vento

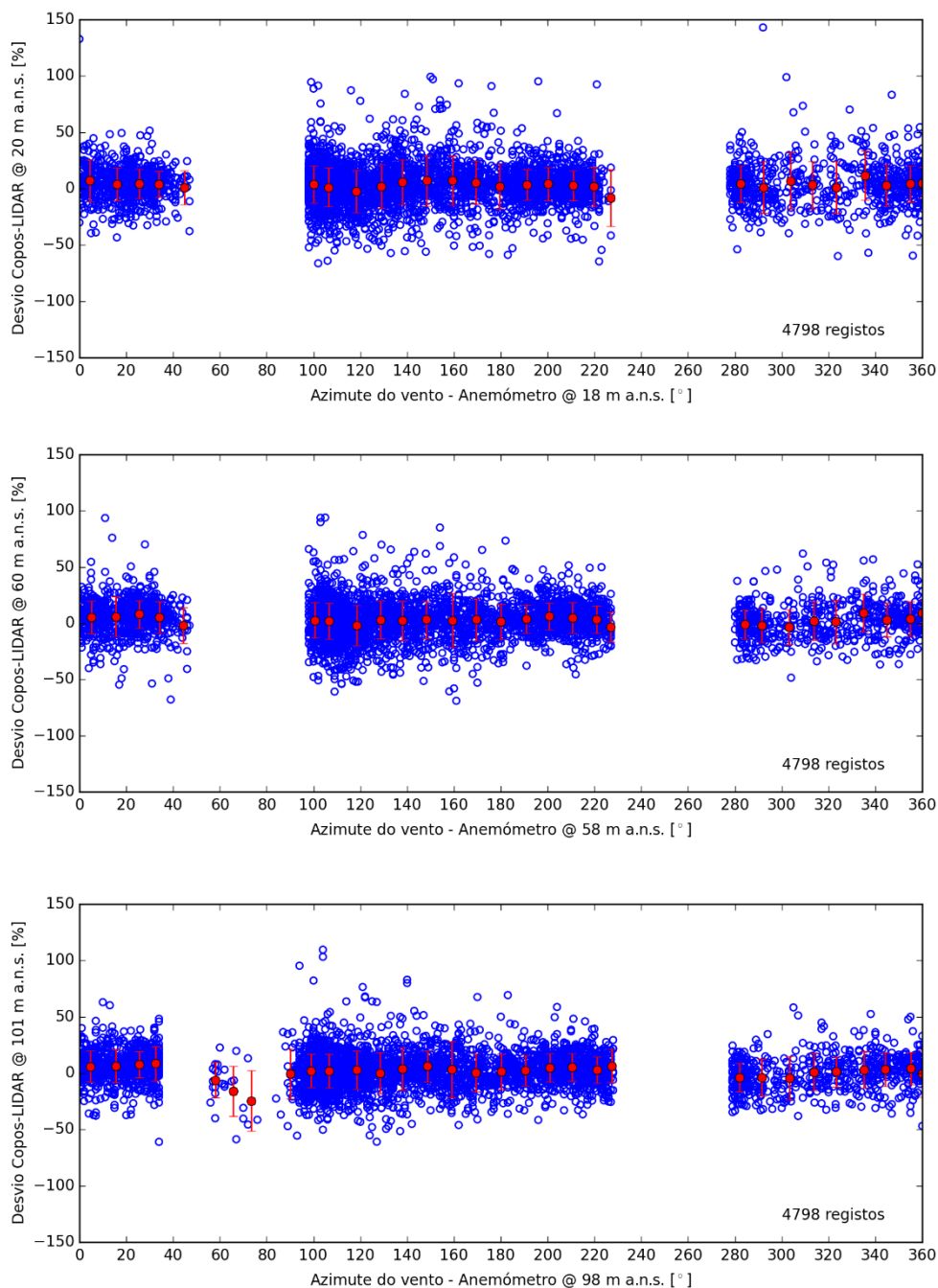
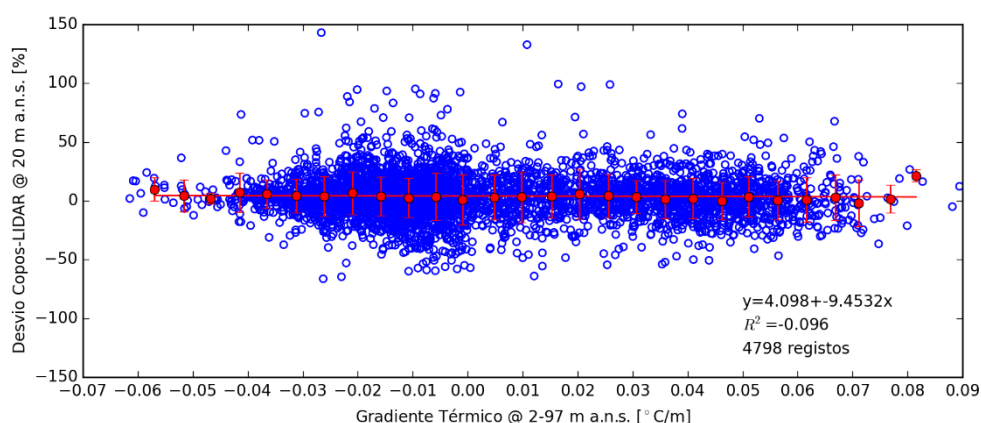


Tabela 12 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do azimuth do vento, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18
Valor médio dos desvios registados [%]	20	7,04	4,06	4,35	3,83	1,00	-	-	-	-	3,65	1,16	-2,64	2,14	5,90	7,05	7,24	5,45	2,05
	60	5,26	5,98	8,05	5,36	-1,92	-	-	-	-	2,62	1,94	-2,05	3,01	2,56	3,20	2,48	3,15	1,29
	101	5,91	6,38	7,81	8,49	-	-6,11	-15,86	-24,63	-0,45	2,17	1,87	2,85	0,11	4,02	6,08	3,25	0,44	1,22
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	18,55	14,55	13,27	11,57	15,21	-	-	-	-	16,47	17,14	18,87	19,35	19,86	22,35	21,85	19,12	19,79
	60	14,44	17,69	12,51	14,22	15,82	-	-	-	-	15,67	15,81	17,96	16,73	17,51	16,79	23,95	18,63	15,71
	101	13,72	14,59	11,53	15,30	-	15,76	22,36	26,81	22,29	14,61	14,89	16,87	18,32	18,94	13,93	24,97	17,06	15,92

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 19	Bin 20	Bin 21	Bin 22	Bin 23	Bin 24	Bin 25	Bin 26	Bin 27	Bin 28	Bin 29	Bin 30	Bin 31	Bin 32	Bin 33	Bin 34	Bin 35	Bin 36
Valor médio dos desvios registados [%]	20	3,40	4,19	2,69	1,79	-8,09	-	-	-	-	4,20	1,19	6,90	3,31	1,08	11,65	2,94	4,21	5,02
	60	3,74	6,05	4,79	3,54	-3,31	-	-	-	-	-0,98	-1,94	-3,28	2,10	1,37	9,27	2,85	3,93	9,42
	101	2,50	4,74	5,38	2,92	6,39	-	-	-	-	-3,88	-3,89	-4,32	1,16	1,21	3,05	3,22	4,20	-0,35
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	13,57	14,64	13,37	17,69	25,07	-	-	-	-	16,14	22,83	25,01	21,04	22,99	21,83	18,27	16,34	13,83
	60	12,58	11,75	13,41	12,12	13,19	-	-	-	-	12,92	14,84	15,40	17,04	19,67	16,95	14,98	15,45	11,07
	101	13,55	12,65	12,05	11,68	14,74	-	-	-	-	12,43	16,31	19,27	16,65	13,32	16,34	14,95	14,18	20,87

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, em função do gradiente Térmico



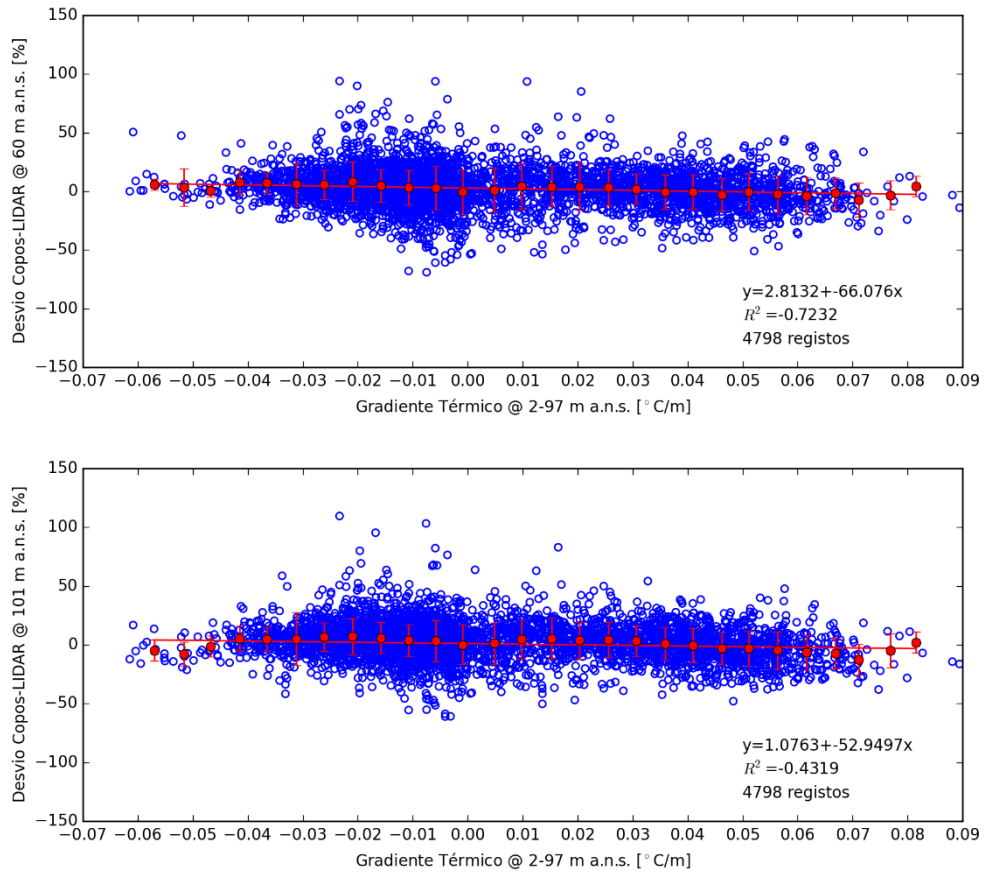


Tabela 13 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do gradiente térmico, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	9,78	4,38	1,99	7,19	5,63	4,21	3,86	6,66	3,85	2,65	3,47	0,99	3,11	3,26
	60	5,97	3,48	0,61	7,63	7,11	6,07	5,67	8,31	4,74	3,20	2,84	-0,45	0,93	4,21
	101	-4,60	-7,82	-1,25	5,49	4,65	5,04	6,70	7,20	5,86	3,87	3,29	0,18	1,24	4,64
Desvio- padrão dos desvios registrados [%]	20	9,99	13,61	4,63	16,70	12,10	14,23	16,93	18,07	16,61	16,80	20,09	21,41	18,99	21,57
	60	4,78	16,11	5,46	10,41	8,99	17,82	12,28	16,62	14,18	14,73	18,34	18,70	18,38	19,40
	101	9,08	10,30	8,95	10,62	10,52	22,58	12,22	15,25	13,29	13,39	17,63	16,72	17,71	16,71

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18	Bin 19	Bin 20	Bin 21	Bin 22	Bin 23	Bin 24	Bin 25	Bin 26	Bin 27	Bin 28
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	3,81	5,93	4,29	3,50	1,26	2,17	0,11	3,62	0,57	1,05	2,94	-1,99	1,61	21,51
	60	4,04	3,97	3,42	2,02	-0,58	-0,33	-2,70	-0,31	-2,39	-3,87	-1,68	-7,28	-3,20	4,23
	101	5,28	3,69	4,30	3,16	0,92	-0,52	-3,13	-3,08	-4,60	-6,25	-7,34	-12,59	-4,90	2,15
Desvio- padrão dos desvios registrados [%]	20	18,34	21,28	18,45	13,92	16,36	17,13	16,04	17,23	16,57	18,90	19,44	19,73	11,85	5,17
	60	17,09	19,73	15,57	12,76	14,47	14,75	13,78	15,68	15,49	15,84	13,42	14,51	12,19	8,68
	101	17,61	15,89	15,07	13,05	14,15	14,64	13,94	14,88	15,65	14,66	12,94	13,00	14,65	9,07

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do *shear factor*

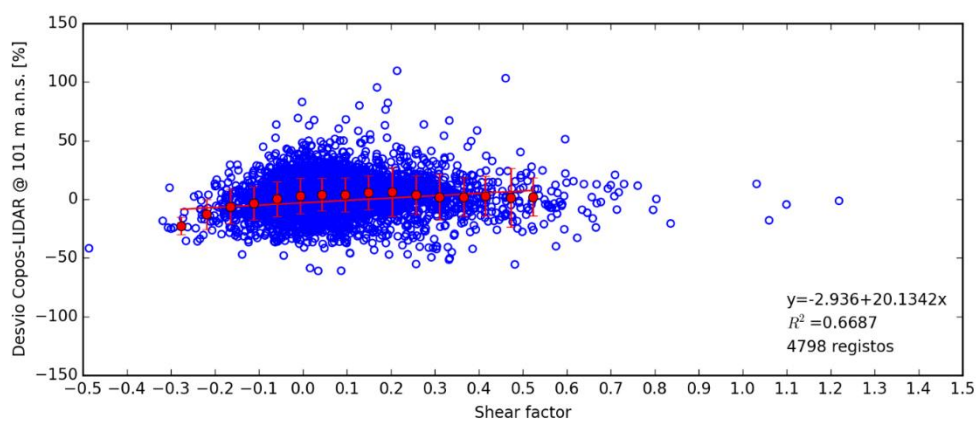
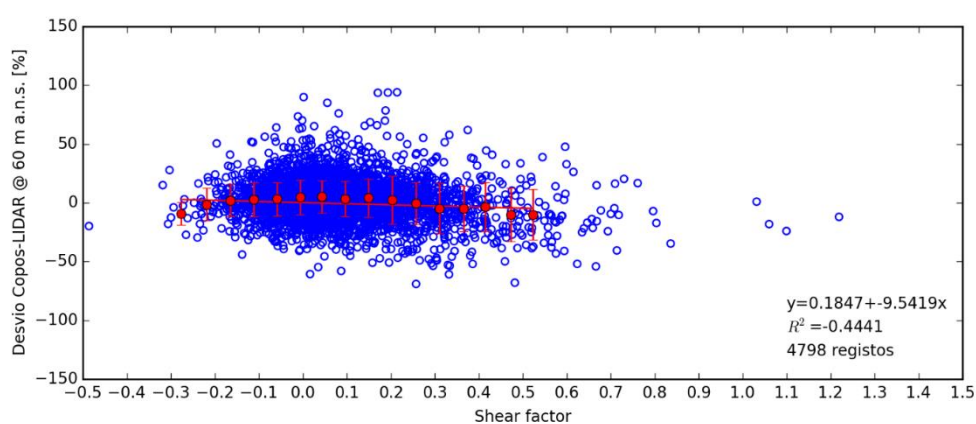
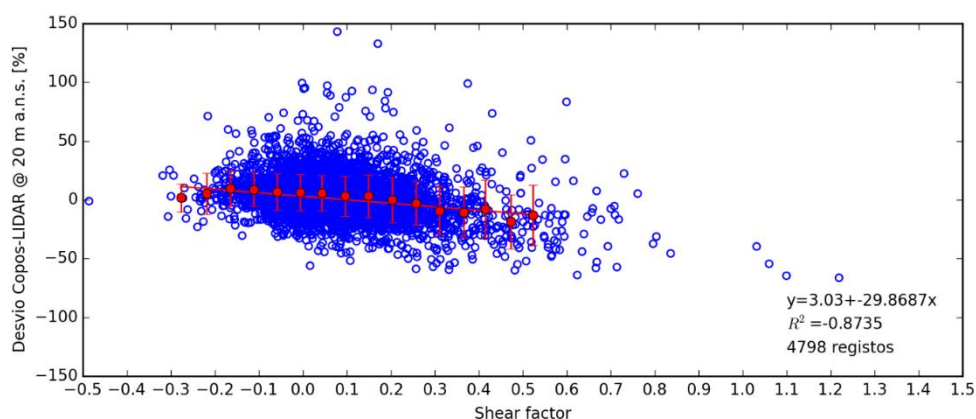
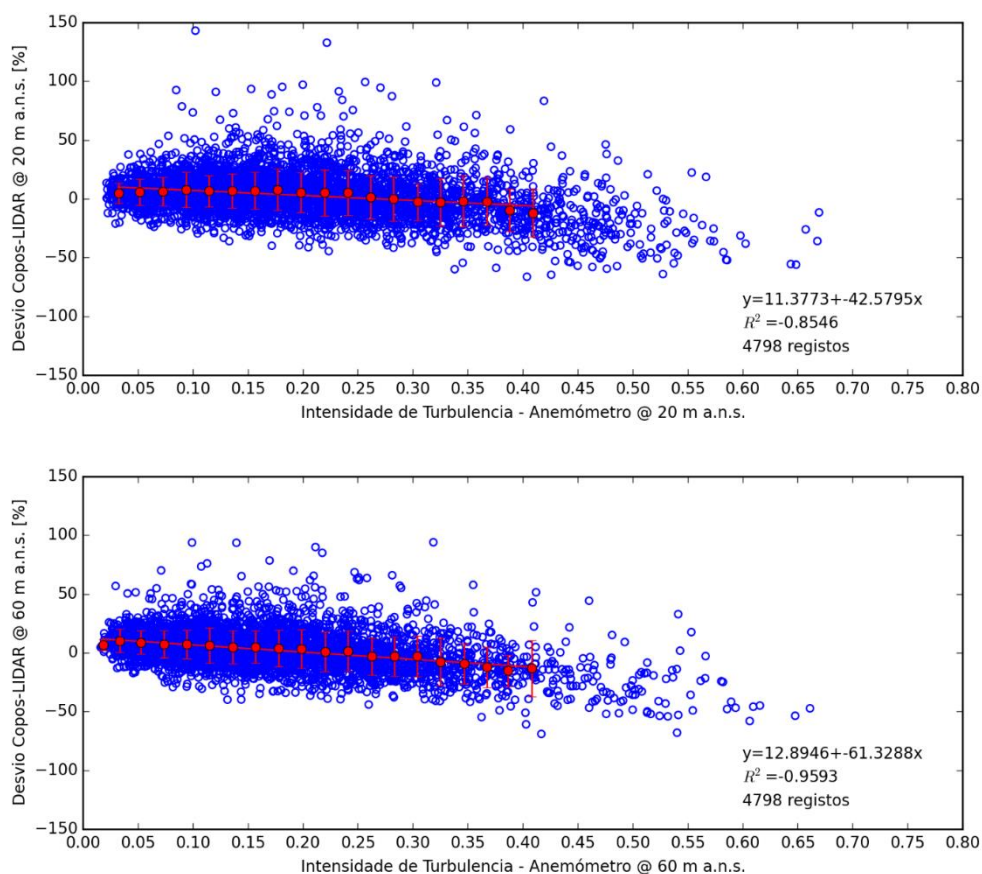


Tabela 14 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do shear factor, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16
Valor médio dos desvios registados [%]	20	1,86	5,26	9,55	8,91	6,83	6,32	5,91	3,19	3,33	-0,24	-2,91	-9,29	-10,41	-7,82	-18,57	-13,21
	60	-9,35	-1,35	2,15	2,86	3,34	4,60	5,09	3,45	4,16	2,47	-0,29	-4,65	-4,91	-3,43	-10,28	-10,00
	101	-22,55	-12,69	-6,09	-3,28	0,29	3,01	4,11	3,83	5,74	6,42	4,00	1,92	2,12	3,03	1,46	1,99
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	11,84	17,57	15,14	14,36	15,38	15,56	15,04	17,01	18,18	19,25	18,44	20,76	21,58	24,66	22,96	25,62
	60	9,76	13,87	13,99	14,66	14,30	14,68	13,87	14,93	16,02	20,42	17,92	21,50	19,22	20,82	22,78	21,47
	101	7,68	12,89	14,62	14,05	14,66	14,97	13,63	14,43	14,62	20,81	16,40	19,39	16,17	16,88	25,25	16,22

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função da intensidade de turbulência



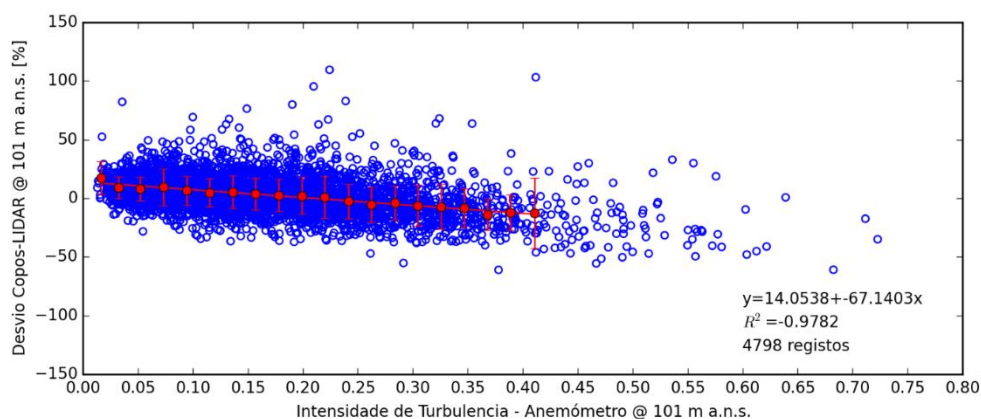


Tabela 15 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da intensidade de turbulência, para desvios a 20,60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-	8,04	8,03	8,52	8,48	5,99	4,72	4,47	2,84	2,04
	60	6,74	10,19	8,94	7,26	7,24	6,38	5,00	5,01	3,87	3,33
	101	17,32	9,22	8,03	9,48	6,69	4,76	5,44	3,95	2,60	2,05
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	-	8,50	10,83	10,23	12,16	12,96	12,52	13,62	18,86	14,87
	60	4,93	9,92	9,87	11,42	12,23	14,86	14,06	13,90	15,30	16,34
	101	14,01	9,08	9,77	15,59	12,30	11,97	14,12	13,59	13,84	15,65

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18	Bin 19	Bin 20
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	1,76	3,00	-0,40	-1,14	-1,67	-2,14	4,42	-2,89	-7,06	-6,72
	60	1,02	1,64	-3,07	-3,13	-2,89	-7,57	-9,39	-12,15	-15,12	-13,21
	101	1,20	-2,57	-5,34	-3,91	-6,11	-7,07	-8,41	-13,83	-12,26	-12,62
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	17,12	15,77	15,48	16,47	14,05	15,08	22,07	19,57	18,63	14,26
	60	17,01	17,20	15,59	16,81	17,40	20,11	17,24	17,13	13,36	23,81
	101	17,91	14,68	15,22	14,51	17,66	19,05	16,88	13,07	15,03	29,92

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função da inclinação do escoamento

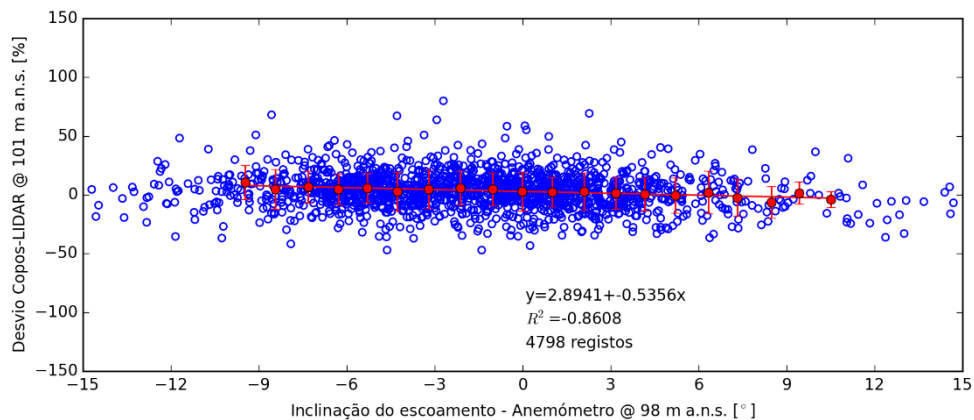
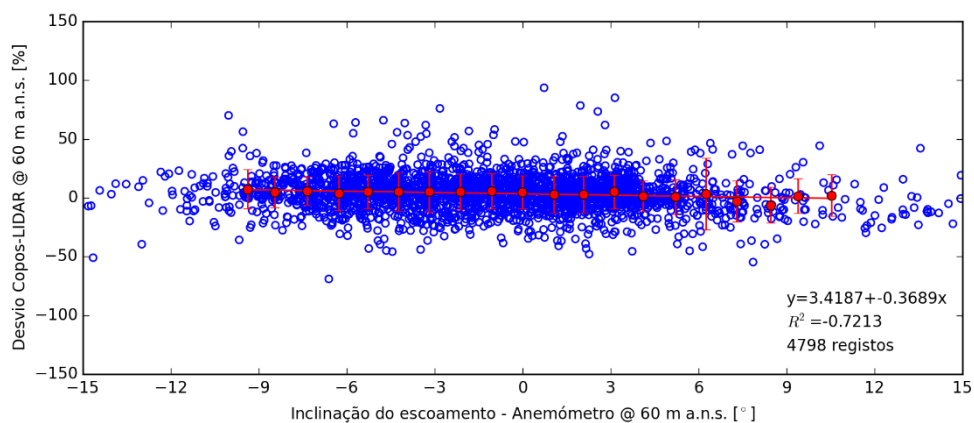
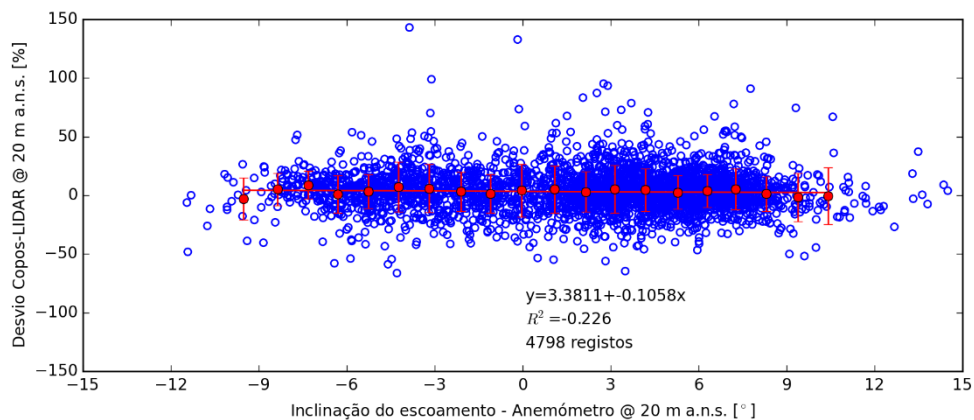
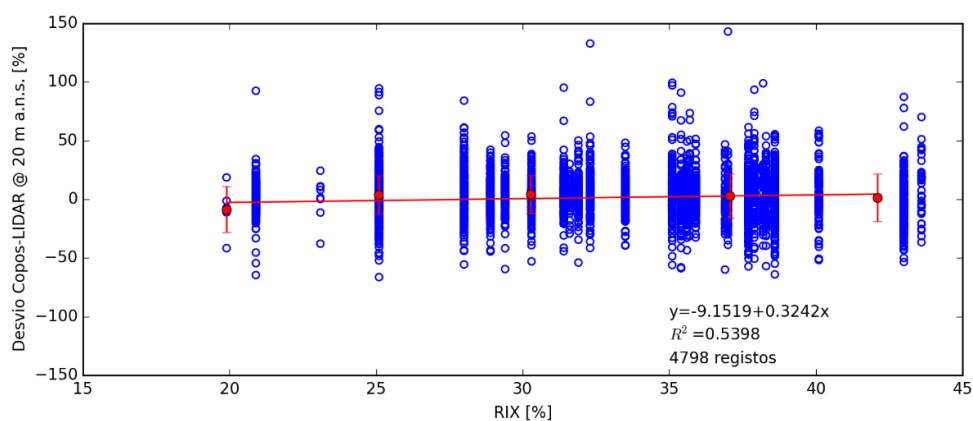


Tabela 16 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da inclinação do escoamento, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10
Valor médio dos desvios registados [%]	20	-2,92	5,11	8,82	1,02	3,35	7,08	5,93	3,25	1,34	4,15
	60	7,36	4,78	5,70	4,07	5,14	5,17	5,15	5,11	5,88	4,89
	101	9,17	3,03	5,73	4,82	5,89	2,96	3,76	5,75	4,70	2,99
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	18,12	13,62	11,86	16,15	14,41	21,27	20,66	16,66	16,57	22,48
	60	16,76	13,23	11,96	14,90	14,11	16,12	17,09	15,39	14,83	13,94
	101	16,69	18,26	13,95	12,91	12,46	16,37	15,14	14,20	14,19	16,46

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18	Bin 19	Bin 20
Valor médio dos desvios registados [%]	20	5,22	3,06	5,28	4,72	2,65	3,93	5,33	1,22	-1,61	-0,37
	60	2,69	2,92	5,15	1,53	0,89	3,46	-2,91	-6,09	1,68	2,08
	101	2,43	3,17	0,73	0,94	-0,48	2,12	-0,49	-5,89	7,14	-10,09
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	20,16	17,28	20,15	18,09	14,20	14,18	17,42	14,59	20,64	24,09
	60	15,90	15,41	14,36	13,12	14,78	30,45	17,26	15,25	14,67	17,58
	101	12,58	16,05	13,98	15,27	14,92	17,99	16,01	14,78	14,22	10,37

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, em função do RIX



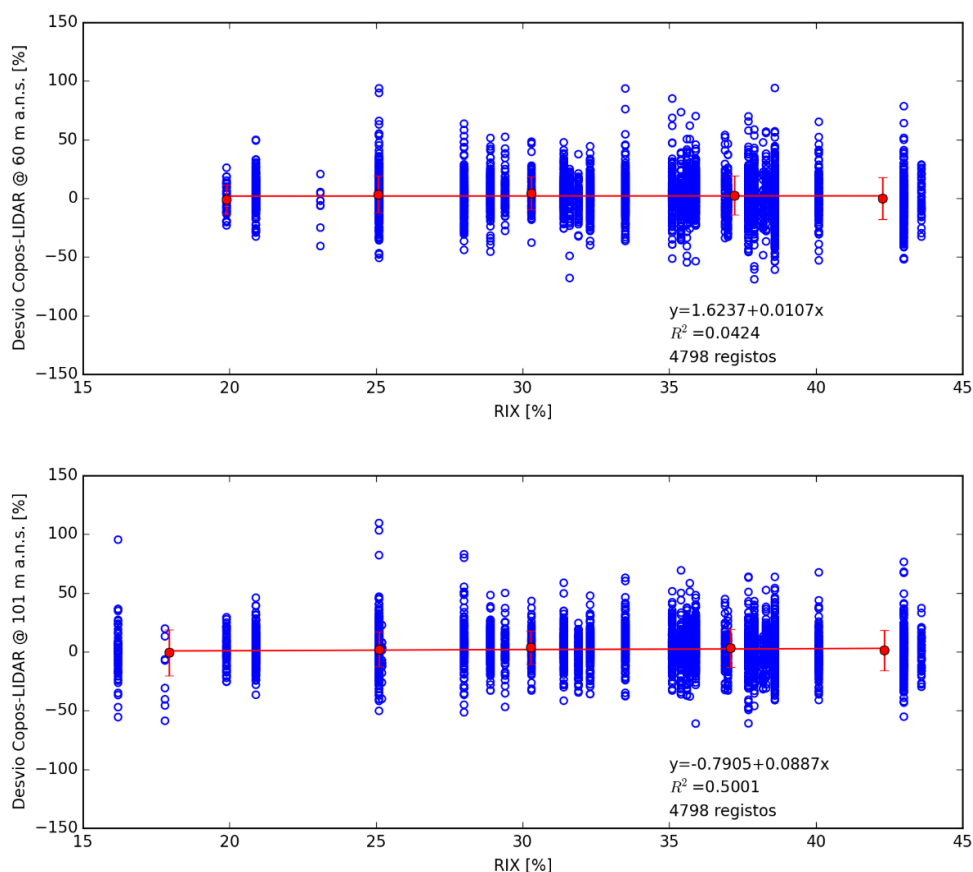


Tabela 17 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do RIX, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-8,53	3,99	4,38	2,92	1,55
	60	-0,91	3,61	4,34	2,64	0,09
	101	-0,63	1,98	3,72	3,18	1,35
Desvio- padrão dos desvios registrados [%]	20	19,47	16,53	16,08	18,85	20,34
	60	12,41	15,65	14,04	16,91	17,97
	101	19,68	14,80	14,28	16,06	17,14

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do declive médio

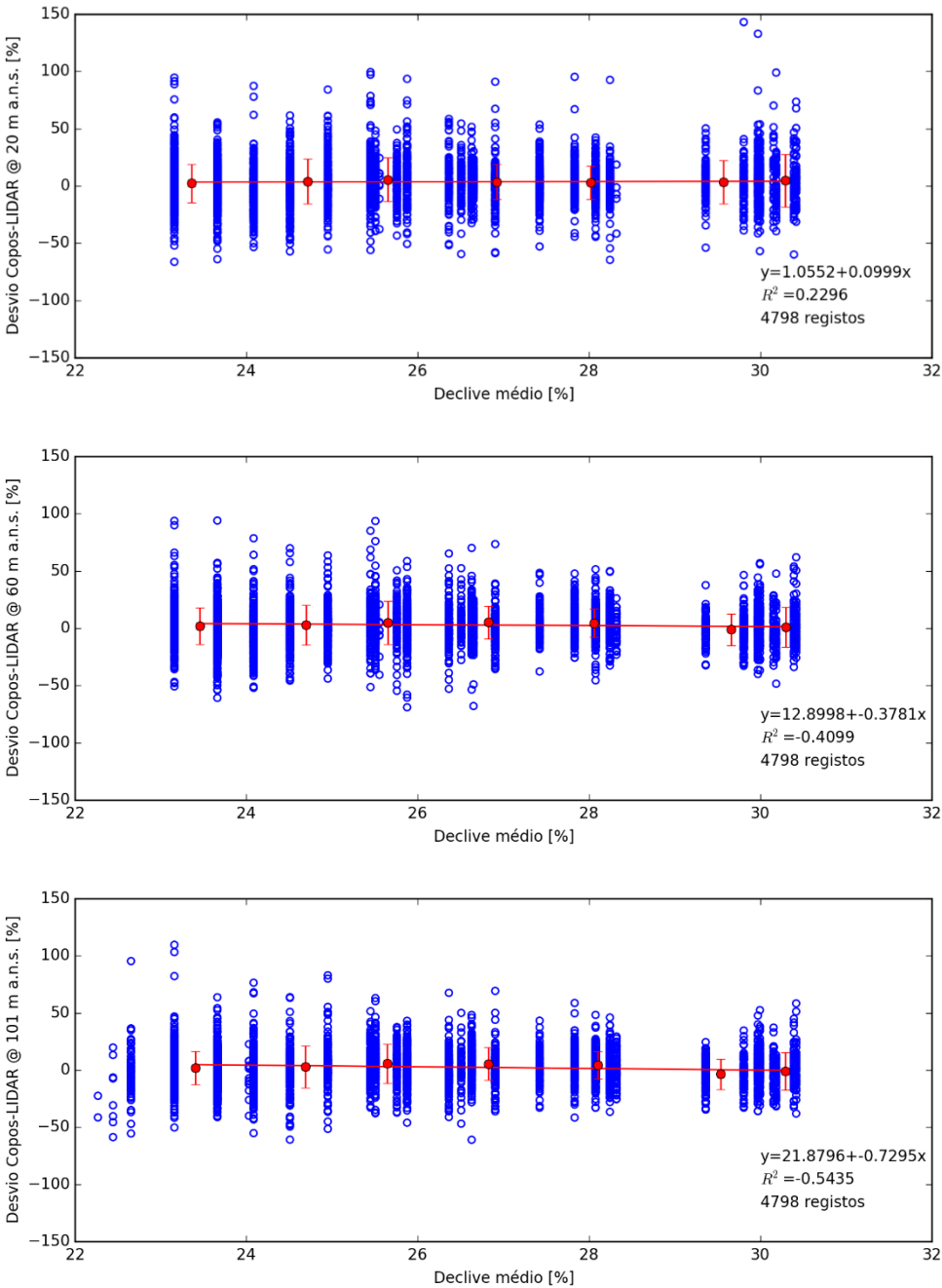


Tabela 18 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do declive médio, para desvios a 20, 60 e 101 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7
Valor médio dos desvios registados [%]	20	2,18	4,00	5,53	3,48	3,07	3,27	4,67
	60	1,78	2,90	4,86	5,11	4,55	-1,19	0,96
	101	2,06	2,70	5,60	5,41	4,32	-3,59	-0,84
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	16,79	19,53	19,00	15,32	14,57	18,91	22,93
	60	15,95	17,28	18,67	14,20	12,49	13,64	17,45
	101	14,51	18,41	17,15	14,32	12,17	13,46	16,40

ANEXO G: Testes de Sensibilidade - Vale de Estrela

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemómetro de referência e o LIDAR, em função do azimuth do escoamento

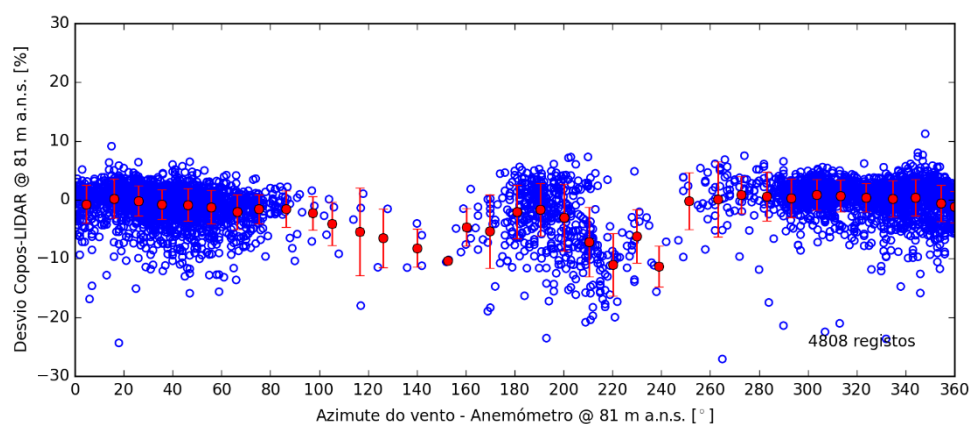
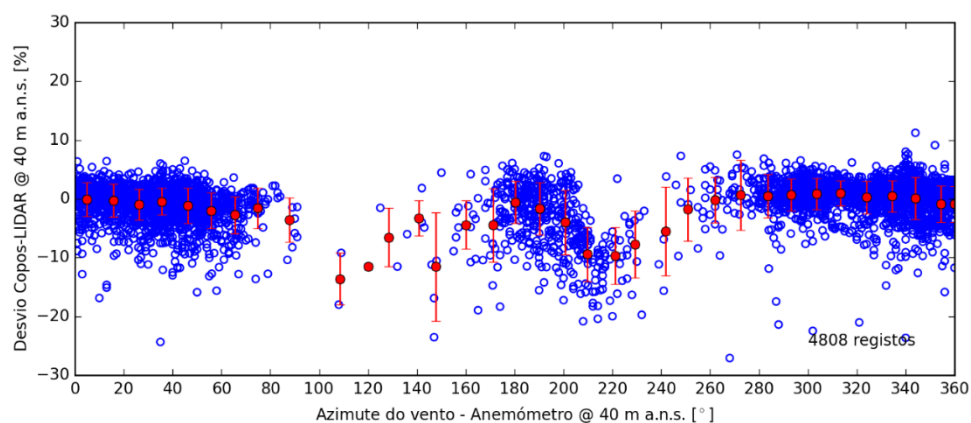
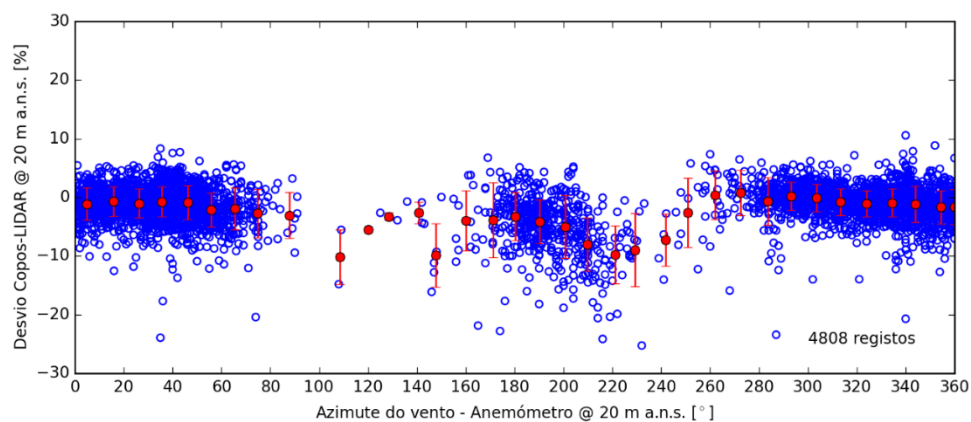
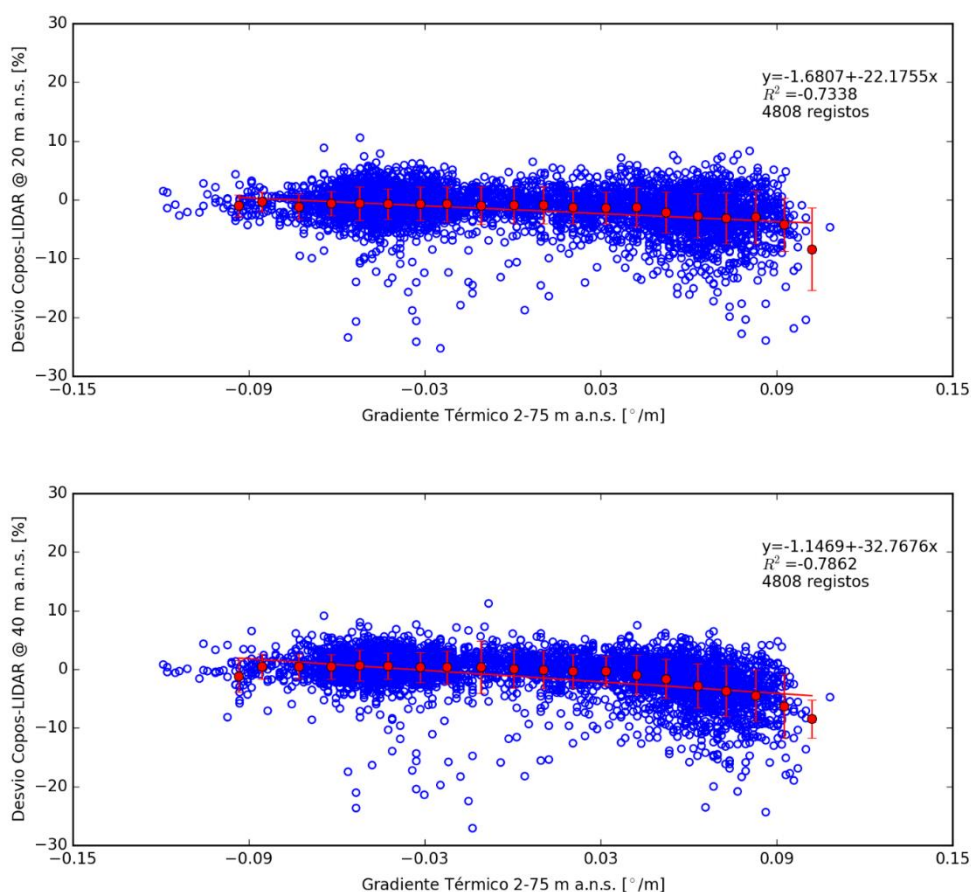


Tabela 19 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do azimuth do vento, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-1,13	-0,71	-1,02	-0,73	-0,86	-2,13	-1,96	-2,75	-3,05	-	-10,18	-5,55	-3,27	-2,61	-9,86	-3,95	-3,86	-3,28
	40	-0,08	-0,26	-0,96	-0,45	-1,18	-2,00	-2,74	-1,57	-3,56	-	-13,60	-11,48	-6,53	-3,27	-11,55	-4,42	-4,48	-0,61
	81	1,74	2,93	2,42	1,85	1,07	0,88	0,34	1,28	1,05	2,57	-0,59	-2,73	-9,40	-9,46	-8,88	-7,80	-4,46	-1,16
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	2,74	2,52	2,47	2,55	2,93	2,89	3,57	4,14	3,89	-	4,63	-	0,63	1,81	5,44	5,11	6,35	4,10
	40	2,88	2,79	2,62	2,31	2,97	3,05	3,17	3,43	3,77	-	4,41	-	4,99	3,03	9,27	4,09	6,23	3,57
	81	4,33	3,69	3,71	3,36	3,69	4,11	4,32	3,34	5,44	3,14	7,64	10,31	4,25	7,52	0,91	6,21	6,18	4,96

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 19	Bin 20	Bin 21	Bin 22	Bin 23	Bin 24	Bin 25	Bin 26	Bin 27	Bin 28	Bin 29	Bin 30	Bin 31	Bin 32	Bin 33	Bin 34	Bin 35	Bin 36
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-4,13	-4,99	-8,03	-9,79	-8,96	-7,21	-2,63	0,38	0,76	-0,64	0,17	-0,06	-0,81	-1,11	-0,96	-1,13	-1,67	-1,67
	40	-1,65	-4,01	-9,43	-9,70	-7,70	-5,50	-1,76	-0,16	0,67	0,48	0,67	0,84	0,98	0,25	0,44	0,11	-0,89	-0,91
	81	1,04	0,46	-0,12	-2,37	-1,02	-10,66	-4,97	-1,58	1,56	1,83	1,01	1,89	1,96	2,23	2,54	2,98	2,08	2,83
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	3,71	5,41	4,58	4,94	6,25	4,45	5,89	4,20	3,90	4,05	2,44	2,32	2,29	2,22	2,37	3,10	2,86	3,00
	40	4,44	5,44	4,60	4,84	5,71	7,55	5,39	3,89	5,95	3,72	2,75	2,68	2,14	2,77	2,66	3,58	3,10	3,05
	81	4,67	6,45	5,45	8,74	3,26	3,97	4,52	7,2	3,48	3,63	4,60	3,18	3,40	3,55	3,96	3,86	4,26	3,12

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do gradiente térmico



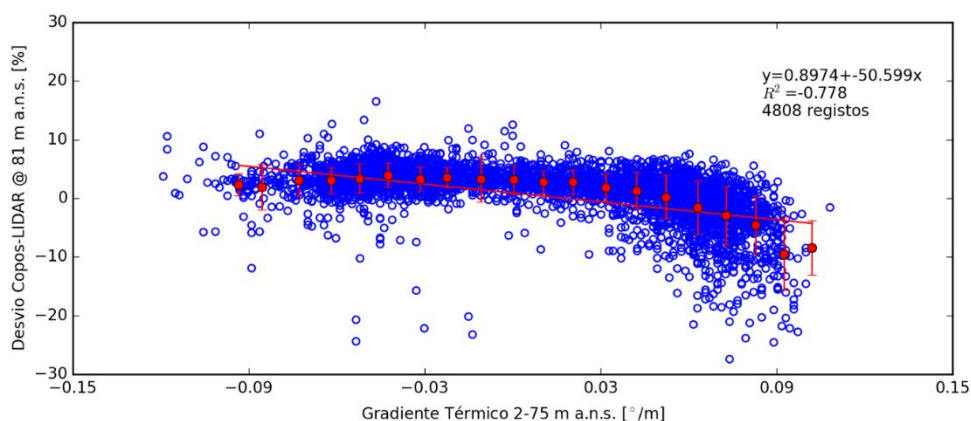


Tabela 20 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do gradiente térmico, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10
Valor médio dos desvios registados [%]	20	-0,97	-0,33	-1,15	-0,62	-0,62	-0,72	-0,64	-0,71	-0,94	-0,91
	40	-1,14	0,50	0,53	0,44	0,69	0,62	0,34	0,38	0,37	0,13
	81	2,34	1,92	3,05	3,10	3,43	3,98	3,29	3,56	3,28	3,18
Desvio- padrão dos desvios registados [%]	20	1,84	1,68	2,11	2,10	2,87	2,57	2,90	2,94	3,18	3,03
	40	2,72	2,14	2,12	2,07	2,60	2,23	2,57	2,76	4,45	3,31
	81	1,87	3,90	2,66	2,26	2,47	1,99	2,11	1,72	3,89	2,53

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18	Bin 19	Bin 20
Valor médio dos desvios registados [%]	20	-0,89	-1,26	-1,32	-1,23	-2,10	-2,73	-3,13	-2,92	-4,19	-8,37
	40	-0,09	-0,32	-0,30	-0,93	-1,60	-2,82	-3,72	-4,49	-6,27	-8,44
	81	2,76	2,79	1,85	1,29	0,20	-1,56	-2,95	-4,58	-9,46	-8,45
Desvio- padrão dos desvios registados [%]	20	3,21	2,84	2,71	3,34	3,47	3,80	4,32	4,51	4,50	7,01
	40	3,17	2,83	2,53	3,36	3,31	3,80	4,33	4,37	5,43	3,26
	81	1,97	2,07	2,44	3,14	3,73	4,53	4,95	4,92	6,22	4,63

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do *shear factor*

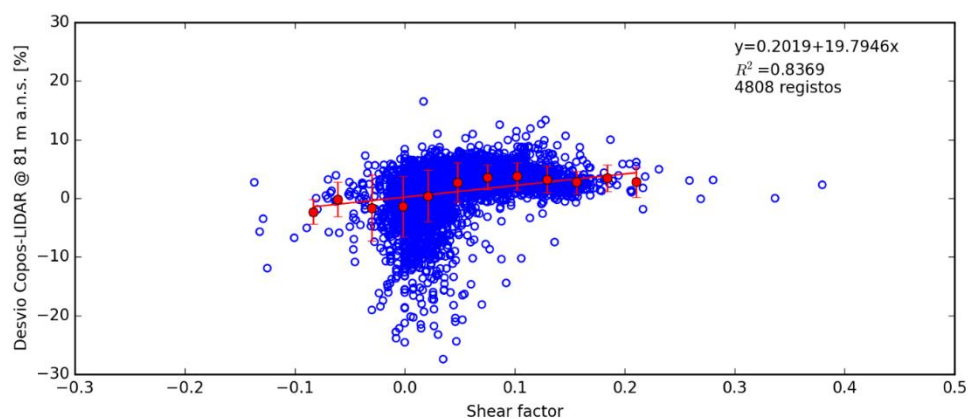
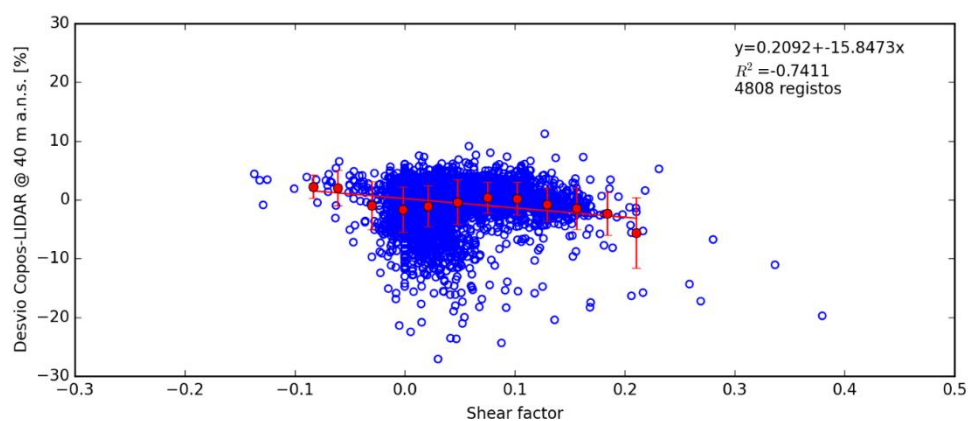
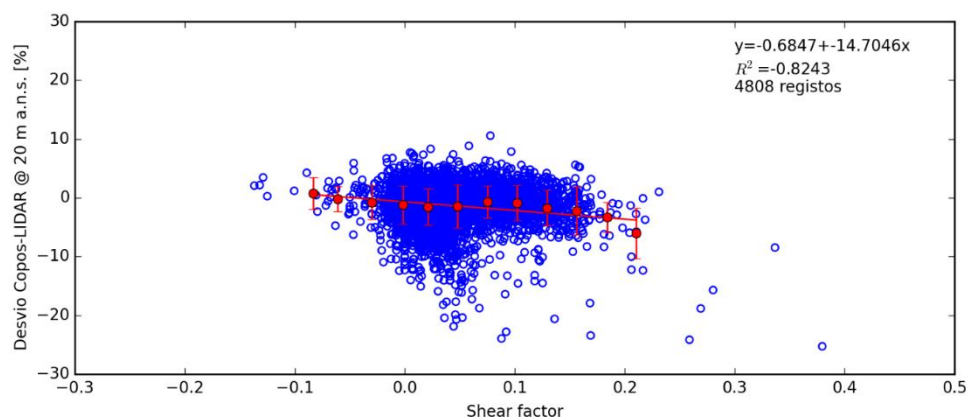


Tabela 21 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do shear factor, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10	Bin 11	Bin 12
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	0,79	-0,22	-0,79	-1,20	-1,57	-1,45	-0,69	-0,89	-1,70	-2,19	-3,33	-6,02
	40	2,26	2,05	-0,97	-1,68	-1,07	-0,35	0,39	0,21	-0,79	-1,48	-2,35	-5,61
	81	-2,29	-0,17	-1,61	-1,40	0,43	2,73	3,62	3,76	3,24	2,76	3,44	2,77
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	2,71	2,15	2,91	3,24	3,12	3,65	2,71	3,02	3,07	4,09	2,54	4,32
	40	1,95	2,98	4,07	3,87	3,48	3,80	2,61	2,77	2,82	3,53	3,62	5,98
	81	2,09	2,94	5,66	5,16	4,39	3,39	2,10	2,30	2,30	1,93	2,26	2,56

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função da intensidade de turbulência

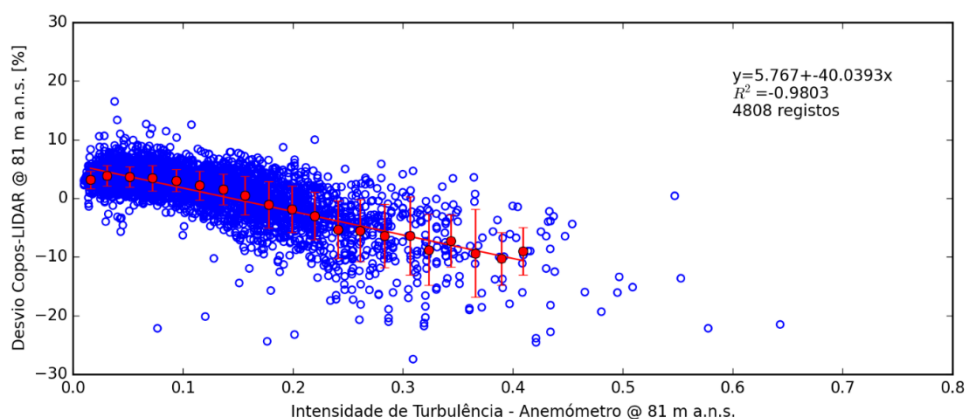
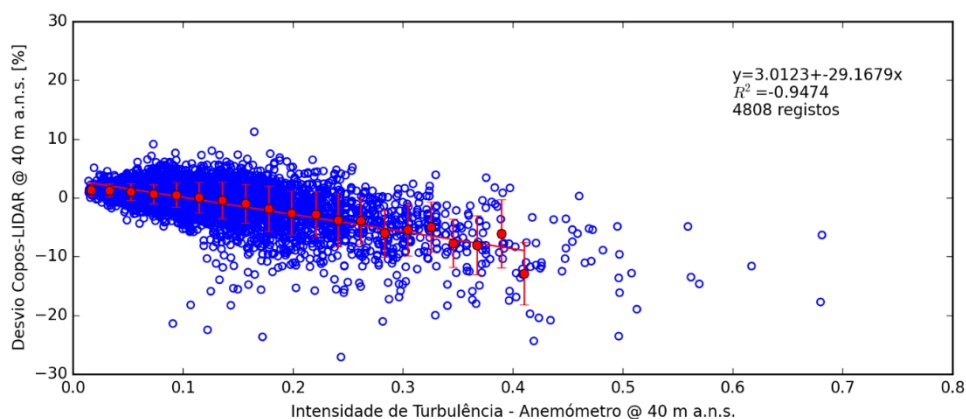
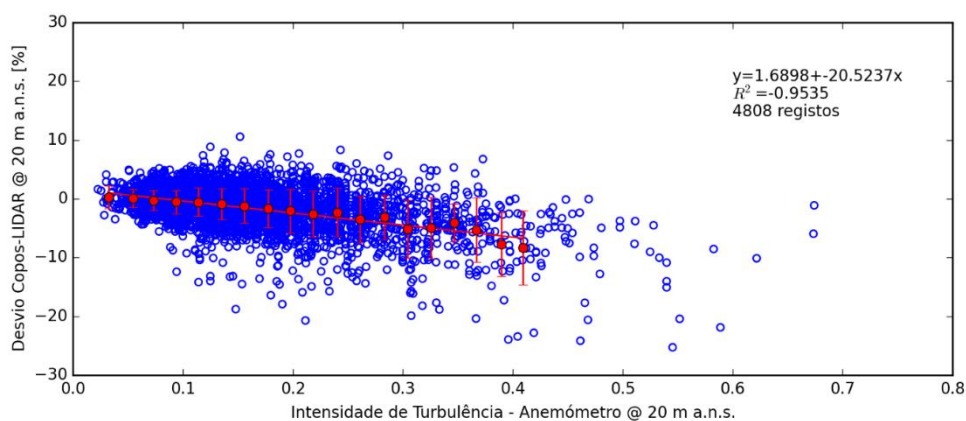
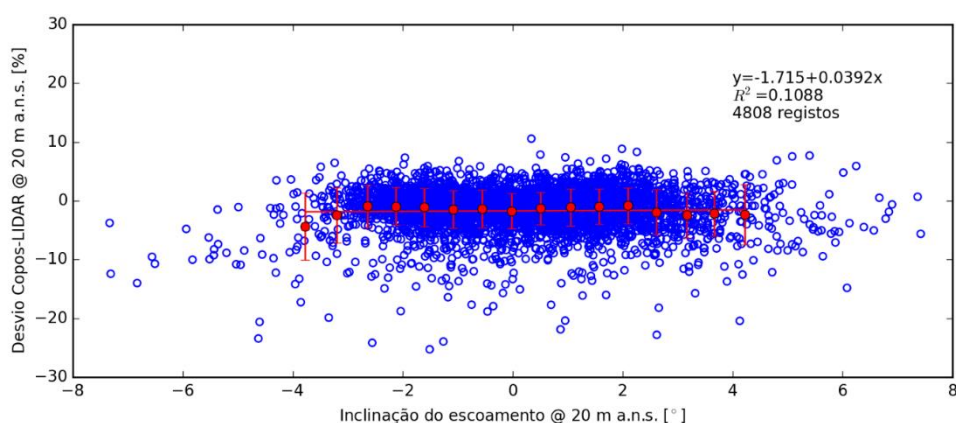


Tabela 22 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da intensidade de turbulência, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	3,16	3,91	3,66	3,46	3,04	2,21	1,57	0,48	-1,04	-1,85
	40	1,36	1,28	1,05	0,68	0,52	0,07	-0,43	-0,94	-1,80	-2,57
	81	3,16	3,91	3,66	3,46	3,04	2,21	1,57	0,48	-1,04	-1,85
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	1,47	1,74	1,77	2,17	1,92	2,45	2,59	3,30	3,97	3,94
	40	1,11	1,13	1,42	1,67	2,10	2,58	3,10	3,28	3,87	3,70
	81	1,47	1,74	1,77	2,17	1,92	2,45	2,59	3,30	3,97	3,94

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16	Bin 17	Bin 18	Bin 19	Bin 20
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-2,99	-5,30	-5,47	-6,39	-6,37	-8,76	-7,26	-9,35	-10,30	-8,99
	40	-2,77	-3,80	-3,89	-6,05	-5,43	-4,92	-7,70	-8,03	-6,13	-12,87
	81	-2,99	-5,30	-5,47	-6,39	-6,37	-8,76	-7,26	-9,35	-10,30	-8,99
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	4,06	4,96	5,25	5,43	6,66	6,03	4,46	7,49	4,51	4,08
	40	3,80	4,55	3,94	4,06	4,46	4,25	4,13	5,05	5,80	5,33
	81	4,06	4,96	5,25	5,43	6,66	6,03	4,46	7,49	4,51	4,08

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função da inclinação do escoamento



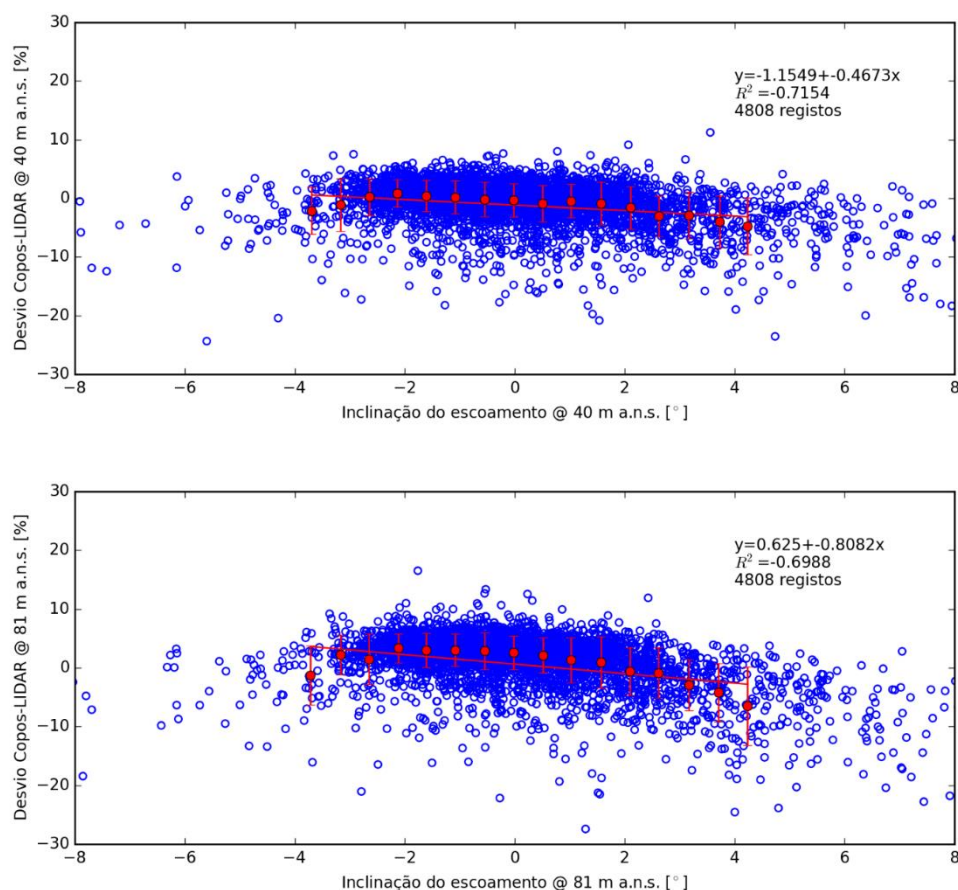


Tabela 23 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função da inclinação do escoamento, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8	Bin 9	Bin 10	Bin 11	Bin 12	Bin 13	Bin 14	Bin 15	Bin 16
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-4,35	-2,45	-0,90	-0,94	-1,09	-1,45	-1,35	-1,71	-1,31	-1,09	-1,00	-0,81	-1,92	-2,43	-2,17	-2,33
	40	-2,08	-1,11	0,26	0,86	0,41	0,19	-0,15	-0,32	-0,87	-0,45	-0,90	-1,58	-3,05	-2,92	-3,96	-4,70
	81	3,46	3,62	3,07	2,77	2,69	2,33	2,31	2,06	1,55	0,76	-0,13	-0,68	-1,62	-3,19	-3,93	-4,27
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	5,73	4,72	3,65	3,21	3,25	3,21	3,17	3,00	2,72	3,12	2,98	3,04	3,81	3,83	3,80	5,14
	40	3,99	4,52	3,13	2,34	2,68	2,80	2,92	2,84	3,05	2,85	3,66	3,62	3,39	3,96	4,46	4,84
	81	2,93	2,55	2,70	2,58	2,93	3,05	2,97	2,66	3,39	4,22	4,34	4,56	5,05	4,65	5,18	4,46

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do RIX

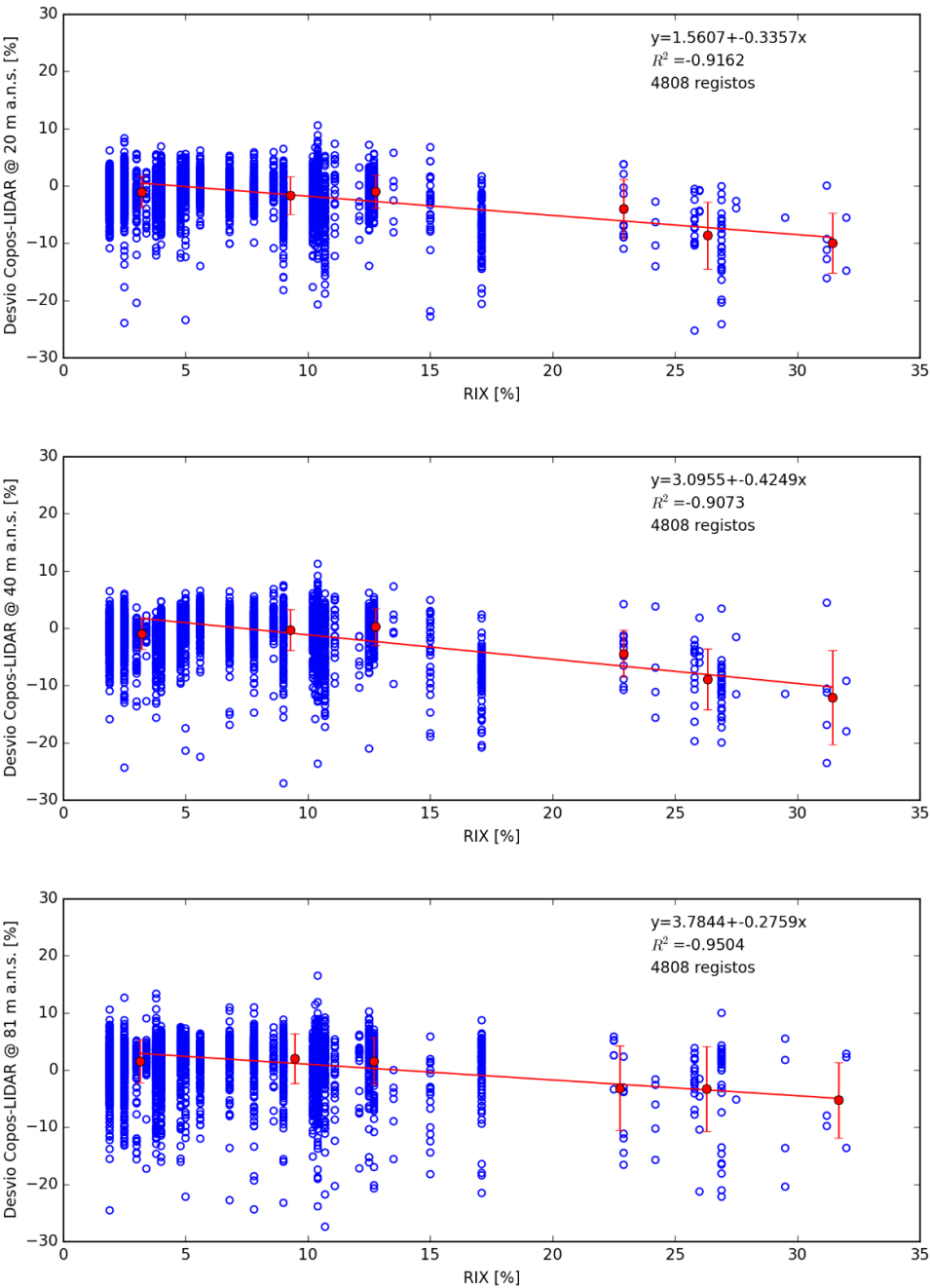


Tabela 24 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do RIX, para desvios a 20, 40 e 81 m a.n.s.

	Altura de medição [m a.n.s.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6
Valor médio dos desvios registrados [%]	20	-1,02	-1,62	-0,99	-3,95	-8,66	-9,95
	40	-0,93	-0,29	0,24	-4,42	-8,89	-12,14
	81	1,56	2,03	1,59	-3,17	-3,29	-5,26
Desvio-padrão dos desvios registrados [%]	20	2,77	3,31	2,92	5,11	5,81	5,22
	40	2,73	3,57	3,22	4,09	5,35	8,23
	81	3,75	4,39	4,13	7,40	7,44	6,64

Desvio percentual entre as medições efetuadas pelo anemômetro de referência e o LIDAR, em função do declive médio

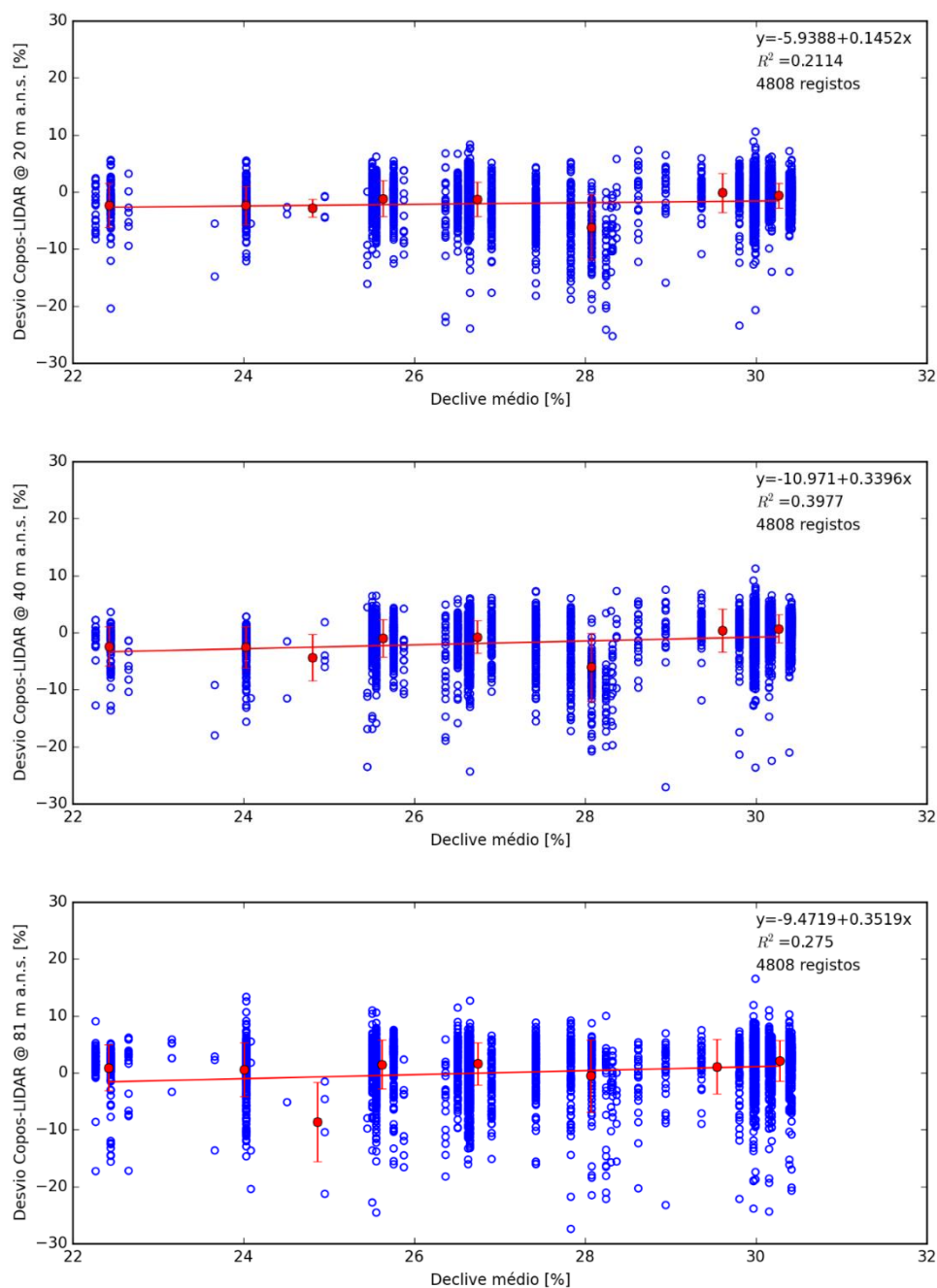


Tabela 25 - Resultados obtidos através do teste de sensibilidade realização em função do declive médio, para desvios a 20, 40 e 81 m a.s.l.

	Altura de medição [m a.s.l.]	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Bin 5	Bin 6	Bin 7	Bin 8
Valor médio dos desvios registados [%]	20	-2,34	-2,36	-2,83	-1,13	-1,27	-6,15	-0,10	-0,62
	40	-2,41	-2,56	-4,36	-0,95	-0,73	-6,05	0,42	0,72
	81	0,90	0,59	-8,60	1,49	1,61	-0,53	1,11	2,10
Desvio-padrão dos desvios registados [%]	20	3,90	3,33	1,56	3,11	3,02	5,77	3,43	2,21
	40	3,44	3,64	4,10	3,31	2,83	5,98	3,77	2,51
	81	4,00	4,75	6,95	4,28	3,71	6,36	4,75	3,58

ANEXO H: Norma IEC 61400 (Anexo L)

No anexo L da norma IEC 61400 encontra-se uma descrição dos requisitos para a operação de sistemas de medição remota como LIDARs e SODARs. Nesta versão são abordados os seguintes casos [10]:

- Uma torre de medição de altura mínima 40 metros, ou da altura da *lower tip*¹⁶ da turbina eólica que está a ser testada deve ser utilizada para monitorizar a performance do sistema de medição remota durante o teste de curva de potência;
- Apenas instrumentos localizados no solo (instrumentos localizados na nacelle não estão incluídos);
- A utilização de dispositivos de medição remota está limitada a terreno plano, ou seja, situações nas quais *site calibration* não é necessária.

Quando comparados com as medições obtidas através de um anemómetro de copos, os dispositivos de deteção remota apresentam normalmente um certo nível de resultados dispersos. Esta dispersão deve-se em parte à sensibilidade do instrumento para diversas condições ambientais. O teste de classificação tem a função de identificar e quantificar estas sensibilidades, para um diverso número de alturas cobrindo o alcance de medição de interesse. Os restantes resultados dispersos são considerados serem provenientes de ruído.

Antes de ser utilizado num teste de curva de potência, cada instrumento de medição remota deve primeiro sujeitar-se a um teste de verificação¹⁷. Como alternativa, este teste de verificação pode também ser realizado aquando do teste de curva de potência. Este teste é simplesmente uma comparação dos valores obtidos com o dispositivo de medição remota, com aqueles obtidos através de anemómetros de copos calibrados, cuja torre de medição na qual se encontram instalados abrange uma porção significativa da altura de interesse para a comparação [10].

H.1 Aquisição de dados

O teste de classificação baseia-se na comparação entre dados obtidos pelo sistema de medição remota e dados obtidos através da torre de medição de referência de grande dimensão, ambos obtidos no mesmo intervalo temporal. As medições serão co localizadas de maneira a que ambos os sistemas de medição meçam o escoamento dentro do mesmo volume de controlo. Os graus de “simultaneidade e co localização que deve ser aplicado nas medições são aqueles que possibilitam a determinação da mais precisa e bem entendida relação entre os dados obtidos. Entre as diretrizes a seguir para a aquisição de dados, destacam-se [10]:

- Os mesmos intervalos médios devem ser utilizados para os valores obtidos pelo sistema de medição remota e pelo sensor de referência poderem ser comparados. Médias de 10 minutos devem ser registadas. Adicionalmente, os desvios padrão assim como os valores extremos de cada intervalo de 10 minutos devem ser registados.
- O número de valores adquiridos por cada instrumento durante cada intervalo deve ser registado, para se obter uma média das medições.

Os sensores de medição remota e sensores de referência deverão ser sincronizados para 1% do intervalo médio, e este grau de sincronização deverá ser verificado e testado pelo menos uma

¹⁶ Altura de varrimento mais baixa do rotor do aerogerador

¹⁷ “verification test”

vez por semana. Caso a comparação dos tempos indicar que ocorreu um desvio entre ambos, o relógio do sistema de medição remota deverá ser reiniciado para ser sincronizado com o relógio do sistema do sensor de referência [10].

Os dados serão adquiridos até os seguintes requisitos de cobertura de dados serem cumpridos:

- Medições da velocidade do vento alusivas ao sensor de referência serão divididas em “bins” de 0,5 m/s centrados em múltiplos inteiros de 0,5 m/s.
- Os dados serão filtrados de acordo com as recomendações indicadas pelo fabricante e pelos requisitos apresentados em 4.4.2.

Após a filtragem ser efetuada, os seguintes requisitos devem ser cumpridos [10]:

- Os requisitos de aquisição de dados de um teste de classificação não são considerados cumpridos até serem registados pelo menos 3 pares de dados válidos, concorrentes, co localizados e filtrados para cada bin de velocidade do vento entre os 4 m/s e os 16 m/s, inclusive.
- A quantidade de dados adquiridos cobrir um mínimo de 180 horas (7,5 dias).
- A duração da campanha de medição deve durar pelo menos 3 meses e cobrir uma vasta gama de condições ambientais.

H.2 Preparação de dados

Os seguintes filtros devem ser aplicados [10]:

- A torre de medição de referência deve-se encontrar livre de esteira/distorção de escoamento derivada da presença de turbinas eólicas ou obstáculos.
- Volumes de prova utilizados pelo equipamento de medição remota para determinar a velocidade radial do escoamento devem-se encontrar livre da esteira e/ou perturbações ao escoamento derivados de turbinas eólicas ou obstáculos. A influência da esteira provocada pela torre de medição nos resultados obtidos deve ser inspecionada traçando o gráfico do rácio entre os dados obtidos pelo sistema de medição remota e do sensor de referência em função da direção do vento. Dados influenciados pela torre de medição ou pelos seus cabos de sustentação devem ser excluídos.
- Os anemómetros de copos de referência devem estar livres da influência de esteira provocada pela própria torre meteorológica e respetivas espias.
- Os anemómetros de copos de referência não podem estar influenciados pela presença de gelo.
- Geralmente, não deverá ser aplicado qualquer filtro referente à precipitação. Esta deverá ser tratada como uma variável ambiental no teste de classificação. No caso de um fabricante de sistemas de medição remota indica que se deve filtrar tais dados, estas diretrizes devem ser seguidas.

H.3 Teste de sensibilidade

O desvio observado entre as medições do sistema de medição remota e do sensor de referência deve ser analisado em termos de sensibilidade relativamente a diferentes variáveis ambientais. O desvio percentual entre os valores médios de 10 minutos obtidos no dispositivo de medição remota e os valores de referência obtidos na torre de medição, a uma determinada altura, é considerado uma variável dependente que deve ser analisada em função de variáveis ambientais num teste de classificação [10] .

$$\frac{(v_{RSD} - v_{reference})}{v_{reference}} \times 100 [\%] \quad (22)$$

Todas as variáveis ambientais são consideradas dentro do âmbito da análise de sensibilidade. Sensibilidade a um parâmetro ambiental pode ser facilmente remediada na configuração de dispositivo de medição remota [10].

Variáveis ambientais devem ser analisadas para identificar qualquer interdependência entre elas. Nos casos em que se identifica uma determinada interdependência, deve realizar-se uma análise mais aprofundada para determinar qual das variáveis influencia o desvio das medições. Apenas variáveis ambientais identificadas a influenciar diretamente o desvio nas medições realizadas devem ser incluídas na análise de sensibilidade. Estas variáveis são então consideradas independentes [10].

Para cada par de variáveis dependentes e independentes, deve ser realizada uma regressão linear OLS¹⁸. Desta regressão deverão ser calculados os seguintes parâmetros:

- Declive, m ;
- Offset, c ;
- Coeficiente de correlação, R^2 ;
- Desvio-padrão da variável independente, std ;
- Valor médio da variável independente, avg .

A estimação do declive e do offset deve ser realizada nas médias dos dados divididos em bins para cada variável ambiental, onde o tamanho do bin a ser usado é dado na tabela 26.

Tabela 26 - Tamanho de bins para diversas variáveis ambientais [10]

Variável Independente	Bin	Unidade
Expoente do <i>wind shear</i>	0,05	[-]
Intensidade de turbulência	0,01	[-]
Chuva	0,1	[mm]
Disponibilidade do dispositivo de medição remota	1	[%]
Direção do Vento	5	[°]
Temperatura do Ar	2	[°C]
Densidade do Ar	0,05	[kgm ⁻³]
Gradiente de temperatura	0,002	[°C/m]
<i>Upflow</i>	0,2	[°]
Gradiente <i>wind veer</i>	0,04	[°/m]

O coeficiente de correlação, desvio-padrão e valor médio das variáveis independentes devem ser estimadas com recurso aos dados médios de 10 minutos nos bins incluídos no teste de sensibilidade [10].

¹⁸ *one-dimensional, two-parametric ordinary least squares (OLS) linear regression analysis*

A classificação de dispositivos de medição remota é análoga à classificação efetuada para anemómetros de copos e sónicos. A classe de um dispositivo de medição remota pode ser avaliada para condições pré-definidas ou para condições específicas existentes no decurso da campanha de medição do dispositivo [10].

Tabela 27 - Parâmetros ambientais para análise de sensibilidade de classe A para anemómetros de copos e sónicos [10]

Variável Independente	Unidades	Max	Min	“Range”	“Fonte”
Expoente do <i>wind shear</i>	[-]	0,80	-0,40	1,20	N/A
Intensidade de turbulência	[-]	0,24	0,03	0,21	Norma
Chuva	[-]	1	0	1	Definição de sensor
Disponibilidade do dispositivo de medição remota	[%]	100	80	20	Definição de filtro
Direção do Vento	[°]	360	0	180	Desvio de 2 direções tem o valor máximo de 180°
Temperatura do Ar	[°C]	40	0	40	Norma
Densidade do Ar	[kgm ⁻³]	1,35	0,90	0,45	Norma
Gradiente de temperatura	[K/m]	0,06	-0,02	0,08	N/A
<i>Upflow</i>	[°]	3	-3	6	Norma
Gradiente <i>wind veer</i>	[° /m]	0,2	-0,2	0,4	N/A

H.4 Avaliação da importância de uma variável ambiental

A importância de uma determinada variável ambiental é avaliada calculando o grau de influência desta no dispositivo de medição remota. O teste de sensibilidade pode indicar que não exista uma relação significativa entre a variável dependente e algumas variáveis independentes, pelo que apenas variáveis independentes relevantes devem ser consideradas.

A análise de sensibilidade de uma variável independente deve ser considerada relevante para todas as distâncias de medição se uma das condições mencionadas for cumprida para uma altura apenas [10].

H.5 Avaliação da interdependência de variáveis ambientais

O teste de sensibilidade anteriormente mencionado assume que as variáveis ambientais em análise são independentes. Na prática isto pode não se verificar, o que pode levar a que sejam consideradas variáveis na classe de precisão que, na realidade, não influenciam diretamente a medição pelo sistema de medição remota, mas influenciam diretamente outra variável ambiental, a qual influenciará, por sua vez, o valor calculado pelo sistema. Esta sobrestimação de incertezas derivadas de variáveis ambientais levará também a uma sobrestimação da incerteza global do sistema [10].

Para contrariar este fenómeno, é necessário eliminar da análise de sensibilidade quaisquer variáveis ambientais correlacionadas, das quais se consiga demonstrar não influenciar diretamente os resultados obtidos. Caso isto seja conseguido, as variáveis com ação indireta na dispersão dos resultados são eliminadas do teste de classificação [10].

H.6 Cálculo da classe de precisão

O princípio fundamental do cálculo de classes de precisão é o seguinte:

- Definir intervalos das variáveis ambientais independentes
- Calcular o desvio máximo de cada variável independente na precisão do dispositivo de medição remota, multiplicando o declive da regressão linear, m , pelo *range* da variável independente
- Calcular a influência máxima acumulada de todas as variáveis independentes na precisão do dispositivo de medição remota, considerando cada variável como sendo complementemente independente

Relativamente ao último princípio fundamental, é reconhecido que cada variável ambiental não é completamente independente. No entanto, para posteriores avaliações de incerteza, há que considerar as diferenças entre condições ambientais existentes durante as medições do dispositivo de medição remota para o teste de curva de potência e durante a verificação de performance. Estas diferenças são altamente dependentes do local de medição da curva de potência e do local do teste de verificação. Esta dependência aos locais de teste separa as variáveis umas das outras nos cálculos de incerteza. Assim, de maneira a determinar a influência máxima acumulada, é necessário assumir independência entre variáveis ambientais. Para calcular a classe de precisão final, a classe de precisão preliminar deve ser dividida por raiz de 2.

H.7 Critério de aceitação

O teste de classificação deve ser executado para um mínimo de dois dispositivos de um determinado tipo de sistema de medição remota, num mínimo de dois locais distintos. Isto possibilita a classificação de diferentes tipos de dispositivos de medição remota, no caso dos resultados destes testes convergirem suficientemente. Pelo menos um dos dispositivos deve ser testado em dois diferentes locais, pelo que no total será necessário um mínimo de três testes para se conseguir classificar o sistema.

Se os resultados forem demasiado divergentes, uma unidade pode ser retirada assumindo que não se encontra a funcionar corretamente, não sendo, portanto, representativa do tipo de instrumento em causa. A retirada de uma unidade não pode, no entanto, fazer com que o requerimento anteriormente mencionado, relacionado com o número mínimo de unidades individuais testadas, não se cumpra. A razão da retirada de uma unidade do teste de sensibilidade deve também ser bem justificada e reportada.

Os resultados para esta classificação são considerados suficientemente convergentes se a ordem de grandeza da influência das variáveis ambientais consideradas é coerente nos diferentes testes de classificação.

H.8 Classificação do dispositivo de medição remota

A classe de um dispositivo de medição remota é determinada a partir, de pelo menos, três testes de classificação (duas unidades no mesmo local e uma unidade em duas localizações distintas).

O declive final de sensibilidade resulta da combinação dos declives dos vários testes de classificação, sendo que:

- Qualquer variável independente resultante de cada teste de classificação deve ser considerada, ou seja, caso uma variável seja considerada independente e significativa num teste em cada três, deverá ser considerada na classe final
- Para cada variável independente significativa:
 - Interpolarm o declive para a altura de interesse para todos os testes de classificação. Não é, no entanto, possível extrapolar declives para alturas de interesse